

ООО «НПО «ИДМ» -

***Ульяновский государственный
технический университет***

С.В. Филимонов, В.И. Филимонов

Интенсивное формообразование гнутых профилей

**Ульяновск
2008**

УДК 621.7
ББК 22.251
Ф53

Рецензенты:

профессор кафедры «Материаловедение и прикладная физика» Ульяновского государственного университета, д.т.н., Н.А. Красильников,
генеральный директор ООО «Пластметпроект» С.В. Курганов

Одобрено редакционно-издательским советом университета

Филимонов С.В.

Интенсивное формообразование гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2008. – 347 с.; илл. 362.

ISBN 5 – 89146 –

Книга предназначена для разработчиков технологии стесненного изгиба и метода интенсивного деформирования гнутых профилей в роликах, а также аспирантов специальности 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением».и Книга также может оказаться полезной технологам и конструкторам, работающим в области профилирования и создания профилировочного и профилегибочного оборудования.

Работа подготовлена в ООО «НПО «ИМД» и на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ.

УДК 621.7
ББК 22.251

Научное издание

ФИЛИМОНОВ Сергей Вячеславович, ФИЛИМОНОВ Вячеслав Иванович

ИНТЕНСИВНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Редакторы **О.С. Бычкова, О.А. Семенова**
Технический редактор И.М. Колганов

Подписано в печать **30. 08. 2007**. Формат 60 × 84/16. Бумага тип. №1. Печать трафаретная. Усл. печ. л. **16,79**. Уч.-изд. л. **16,50**. Тираж **120** экз. Заказ **xxx** .

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32
Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32

ISBN 5 – 89146 –

© Филимонов, С.В., Филимонов, В. И., 2008
© Оформление. УлГТУ, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИХ ПРОИЗВОДСТВА	13
1.1. Применение гнутых тонкостенных профилей в отраслях народного хозяйства	13
1.2. Альтернативные технологии производства гнутых профилей	29
1.3. Применяемые материалы для производства гнутых профилей.....	44
1.4. Дефекты профилей, возникающие при формообразовании, и требования к готовым гнутым профилям	50
1.5. Профилегибочное и вспомогательное оборудование	55
1.6. Анализ схем формообразования профилей в роликах	66
1.7. Теоретический анализ процессов профилирования	93
Выводы	111
2. ПРЕДМЕТ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ.....	113
2.1. Предмет исследования и разработки.....	113
2.2. Задачи исследований и разработки	113
2.3. Методы исследований.....	113
2.4. Классификаторы профилей, механических схем процессов и дефектов профилей, раскрывающие предмет исследования и разработки.....	114
Выводы	125
3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ В РОЛИКАХ	126
3.1. Основные допущения при теоретическом рассмотрении процесса ..	126
3.2. Модели уголковой зоны при интенсивном формообразовании	127
3.3. Зоны деформирования заготовки в межклетьевом пространстве	142
3.4. Схемы формообразования профилей	152
3.5. Классификация способов предотвращения потери устойчивости периферийных элементов профиля.....	155
3.6. Оптимизация углов подгибки элементов профиля.....	157
3.7. Зависимость деформаций подгибаемой полки от способа предотвращения волнистости ее кромки.....	162
3.8. Критерий возникновения кромковой волнистости	166
3.9. Учет эффектов прогиба донной части профиля	174
3.10. Условия формовки гофр в донной части профиля	186
3.11. Число переходов при интенсивном деформировании.....	188
3.12. Осадка заготовки и продольная кривизна профиля	193
Выводы	200

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ	201
4.1. Программа и средства экспериментальных исследований	201
4.2. Исследование уголковой зоны методом конечных элементов	204
4.3. Технологически допустимые и предельные параметры уголковой зоны	213
4.4. Металлографические исследования профилей и заготовок.....	220
4.5. Исследование характеристик профиля тонкими методами	224
4.6. Влияние формы инструмента на формирование уголковой зоны.....	228
4.7. Схемы формообразования при стесненном изгибе	231
4.8. Исследование зоны плавного перехода	236
4.9. Анализ профилей, имевших дефекты при их отработке.....	247
4.10. Определение предельных углов подгибки за один переход.....	250
4.11. Оценка деформаций подгибаемых полок при использовании МИД	255
4.12. Влияние прогиба донной части профиля	261
4.13. Эмпирические модели и расчеты числа переходов.....	265
4.14. Аксиальное поджатие при использовании СИ	273
4.15. Определение силовых параметров процесса	281
4.16. Влияние углов захода профиля в калибр при СИ.....	289
4.17. Формообразование МИД профилей с покрытием	292
4.18. Особенности изготовления МИД перфорированных профилей.....	295
4.19. Особенности изготовления профилей с рифтами.....	299
Выводы	301
5. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ.....	303
5.1. Разработка и расчет профилегибочного оборудования	303
5.2. Динамический режим работы правильного устройства и расчет его параметров.....	308
5.3. Оборудование для производства гофр	317
5.4. Вспомогательное оборудование процессов профилирования	320
5.5. Оборудование ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ»	322
Выводы	328
6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ.....	329
6.1. Этапы проектирования технологического процесса формообразования профилей в роликах	329
6.2. Технологичность изготовления профилей	330
6.3. Расчет ширины заготовки и параметры уголовой зоны.....	332
6.4. Число технологических переходов.....	335
6.5. Выбор профилегибочного оборудования.....	335
6.6. Определение способа формообразования.....	336
6.7. Технологические схемы формообразования при МИД.....	342

6.8. Скоростной режим формообразования	344
6.9. Расположение заготовки по отношению к осям валков.....	345
6.10. Выбор основной оси профиля	346
6.11. Определение углов подгибки	347
6.12. Обеспечение размерной точности сечения профиля.....	349
6.13. Особенности разработки технологии производства специальных профилей.....	353
6.14. Алгоритм разработки технологии производства профилей МИД...	359
6.15. Применение межклетьевых проводок.....	363
6.16. Условия замыкания калибров формирующих роликов.....	364
6.17. Проектирование технологического оснащения	372
6.18. Технологические маршруты изготовления профилей и деталей.....	381
Выводы	387

7. ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ

ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ	389
7.1. Внедрение технологии стесненного изгиба	389
7.2. Внедрение метода интенсивного деформирования	394
7.3. Особенности внедрения оборудования	402
7.4. Экономическая эффективность	407
7.5. Использование результатов работы в учебном процессе	408
7.6. Перспективы развития работы	409
Выводы	409

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 410

Литература 412

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

s	– толщина заготовки;
b	– ширина полки, отбортовки;
L	– протяженность зоны плавного перехода;
L_k	– межклетьеовое расстояние;
B_3	– ширина заготовки (полосы);
α_i	– угол подгибки полки на актуальном переходе;
$\Delta\alpha_i$	– угол подгибки полки за i - переход;
l_k	– длина контактной зоны;
ω	– прогиб донной части заготовки;
V	– скорость профилирования;
a	– длина периода кромковой волнистости;
ρ	– расстояние от рассматриваемой материальной точки до нейтрального слоя;
$\epsilon, \epsilon_{ост}$	– продольные и остаточные деформации в зоне плавного перехода после формообразования соответственно;
θ_i и R_i	– центральный угол и радиус кривизны элемента профиля на i - ом переходе;
C	– ширина донной части профиля
R_y, R_z	– радиусы кривизны профиля соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
ϵ_k	– продольная деформация по кромке;
Δb	– величина подсадки торца заготовки;
r_{i-1}, r_i	– внутренние радиусы зон сгиба соответственно на предыдущем $i-1$ и актуальном i переходах;
z	– зазор в рабочем калибре роликовой пары;
ΔB	– избыток ширины заготовки при стесненном изгибе;
n	– число зон сгиба профиля;
N	– количество переходов (клетей);
P, Q	– сосредоточенная сила (тангенциального сжатия);
$\sigma_{кр}$	– критические напряжения сжатия;
μ	– коэффициент Пуассона;
D	– цилиндрическая жесткость элемента профиля;
σ_s	– предел текучести материала заготовки;
E	модуль упругости материала заготовки;
f	– коэффициент трения;
P_B	– возвращающая сила при правке профиля;
P_a	– аксиальная сила проталкивания профиля в фильеру;
γ	– угол контактного взаимодействия заготовки и ролика;
β	– угол захода профиля в калибр или выхода из него;
СИ	– стесненный изгиб;
МИД	– метод интенсивного деформирования.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития рыночных отношений в России особенно остро стоит проблема развития промышленного производства, повышения его эффективности и улучшения качества продукции.

Требование снижения массы отечественных летательных аппаратов до 10–12 % и повышение их ресурса в 2 – 2,5 раза в последние два десятилетия было весьма актуальной проблемой в связи с традиционным применением в качестве стрингеров планера прессованных профилей, подверженных интенсивной коррозии из-за фюзеляжного конденсата. В то же время в конструкциях самолетов компании «Боинг» применяли длинномерные гнутые плакированные профили, что повышало ресурс планера до 50 – 60 тыс. летных часов по сравнению с 15 – 25 тыс. при использовании прессованных профилей, хотя гнутые профили несколько уступают прессованным по несущей способности.

Однако получение тонкостенных профилей с плакировкой прессованием невозможно. Изготовление профилей в штампах или кромкогибочных устройствах является малопроизводительным; применение этих технологий ограничено небольшой длиной изготавливаемых деталей и простыми конфигурациями поперечных сечений профилей. Традиционное профилирование в авиастроении применять нецелесообразно в связи с его ориентацией на серийный характер производства (из-за громоздкого оборудования, большого количества оснастки, больших временных потерь при переналадке), а также из-за больших радиусовгиба и утонения в зоне сгиба, что снижает служебные характеристики профилей. Метод стесненного изгиба (СИ) (гибка с торцевым сжатием), предложенный Г.В. Проскуряковым и позволяющий получать сечение зоны сгиба близкое к сечению прессованного профиля, не был достаточно изучен в приложении к формообразованию в роликах: отсутствовали модели процессов формообразования, приемлемые технические решения, промышленное оборудование, нормативно-техническая документация. Восполнение этого пробела в технологии представляло собой актуальную научную и техническую проблему, решение которой позволяет повысить ресурс летательного аппарата, снизить его массу, трудоемкость изготовления с одновременным повышением качества и надежности.

Настоящий «профильный бум» последнего десятилетия в условиях меняющейся конъюнктуры и постоянного совершенствования конструкций профильных деталей для строительной индустрии, выдвинули на первый план требование создания малопереходной технологии производства гнутых профилей и компактного оборудования для их производства. Технология и оборудование данного класса делают возможным их приобретение и использование небольшими производственными фирмами, не располагающими значительными инвестиционными ресурсами, для получения значительного экономического эффекта при мелко- и среднесерийном производстве по сравнению с экономическим эффектом от применения традиционного многопереходного профилирования заготовок. Частая смена модельного ряда автомобилей ВАЗ и УАЗ в последние годы также потребовала мобильной и сравнительно дешевой технологии про-

изводства профильных деталей для их производства. Аналогичные проблемы возникли и в других отраслях промышленности.

Для решения этих проблем создан метод интенсивного деформирования (МИД), представляющий собой компромисс между традиционным профилированием и стесненным изгибом. Его отличие от традиционного профилирования состоит в интенсификации схем формообразования (использовании меньшего числа переходов, закрытых калибров, более жестких режимов подгибки полок), специфическом задании радиусовгиба по переходам, в некоторых случаях приложении небольших по сравнению со стесненным изгибом торцевых сил к прямолинейным полкам при сравнительно невысокой скорости профилирования (от 4 до 20 м/мин). В отличие от стесненного изгиба, ориентированного на осадку волнообразной заготовки при ее избыточной ширине и создающего большие силы торцевого поджатия, метод интенсивного деформирования не предусматривает переформовки заготовки за счет приложения осаживающих сил к ее поверхности. Кроме того, отличаются области их применения: СИ применяется для изготовления профилей высотой до 30 – 40 мм и шириной до 60 – 80 мм, в то время как МИД используется при изготовлении многоэлементных профилей высотой до 100 мм и шириной до 500 мм.

Широкому внедрению метода интенсивного деформирования препятствовала малая изученность данного процесса, отсутствие математических моделей процессов, эмпирических данных, способов формообразования, алгоритмов разработки технологии. Одной из наиболее острых проблем при изготовлении широкополочных профилей является проблема потери устойчивости периферийных элементов, в частности, проблема кромковой волнистости. Поэтому исследование метода интенсивного деформирования также представляет собой важную научную проблему, результаты решения которой востребованы практикой.

Методы СИ и МИД объединены нами общим названием «интенсивное формообразование профилей в роликах».

Целью настоящей книги является отражение результатов разработки и внедрения оборудования и технологии интенсивного формообразования гнутых профильных деталей в роликах. Эти работы выполнялись авторами в течение последних 20 лет.

Объектом исследования являлись процессы интенсивного формообразования профилей в роликах и средства их реализации.

Предметом исследования были технологии СИ и МИД производства гнутых тонкостенных профилей преимущественно типовой номенклатуры из алюминиевых, стальных и других материалов с различными видами покрытий или без них, а также профилегибочное оборудование для реализации этих технологий.

Методологической и теоретической основой для разработки служили классические работы по механике деформируемого твердого тела, теории профилирования и обработке металлов давлением отечественных и зарубежных исследователей:

И.П. Ренне, Р. Хилла, Е.А. Попова, В.И. Давыдова, А.С. Вольмира, Г.Я. Гуна, В.В. Соколовского, Ю.Н. Работнова, К.Н. Богоявленского, В.В. Колмогорова, Ю.М. Арышенского, В.И. Ершова, Ф.В. Гречникова, А.Д. Матвеева, М.Е. Докторова и И.С. Тришевского, В.А. Осадчего, Г.В. Проскуракова, С.И. Вдовина, С.Ф. Березовского, И.М. Колганова, Х. Судзуки и М. Киути, Д. Кокадо и Е. Онода, а также ряда других ученых.

Информационной базой работы служили публикации в отечественных и зарубежных журналах, монографии, учебники, и справочники по предметной области, описания патентов, информационные ресурсы Интернет и др.

Авторами получен ряд новых результатов в этой области:

- Впервые разработаны классификаторы профилей, способов их интенсивного формообразования, дефектов профилей, способов предотвращения дефектов профилей, формующего роликового инструмента {отличие предложенного классификатора профилей от известных – учет типологии элементов жесткости; другие классификаторы разработаны в приложении к новым методам формообразования профилей: СИ и МИД (терминология по элементам жесткости, а также название второго метода введены в обиход и обоснованы впервые в работах авторов)};
 - Разработаны новые модели угловой зоны и расчетные модели энергосиловых характеристик процессов интенсивного формообразования;
 - Получена модель протяженности зоны плавного перехода, учитывающая в отличие от известных моделей для традиционного профилирования анизотропию, подсадку и соотношение радиусов формующих роликов;
 - Разработана модель (и алгоритм) оптимизации углов подгибки полок профиля, отличающаяся от известных моделей более тщательным распределением деформаций по переходам, предложена новая методика оценки деформаций подгибаемых полк и др.;
 - Предложена модель прогибов донной части широких профилей, позволяющая в ряде случаев ужесточить режимы подгибки и сократить число переходов (эффект влияния донной части на формообразование обнаружен впервые; аналоги предложенной модели отсутствуют);
 - Предложена полуэмпирическая модель определения числа переходов при производстве методом интенсивного деформирования типовых профилей (аналоги отсутствуют);
 - Разработаны модели и методика расчета профилировочного и профилегибочного оборудования;
 - Новые технические решения по интенсификации формообразования гнутых профилей, по профилегибочному оборудованию и технологическому оснащению подтверждают более 30 авторских свидетельств и патентов авторов.
- Практическая значимость разработок авторов состоит в следующем:
- Высокое качество профильной продукции, изготавливаемой по технологии стесненного изгиба, решение вопросов по маршрутам изготовления, выполнению подсечек, разработке отраслевой нормативно-технической документации позволи-

ло внедрить эту технологию в отрасль авиастроения для производства стрингеров самолетов ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70 и АН-140.

- На основе исследований и разработок метода интенсивного деформирования освоена технология производства около 2000 типоразмеров профилей, которая внедрена в 8 отраслях промышленности более чем на 200 предприятиях Российской Федерации и стран ближнего зарубежья.

- Объем внедрения оборудования включает сотни единиц, в том числе около 200 автоматических и автоматизированных линий профилирования и раскроя рулонов, которые эксплуатируются на предприятиях РФ.

- Срок окупаемости капитальных затрат на оборудование составляет в среднем 1,26 года. Годовой экономический эффект от разработок в расчете на работу внедренных линий профилирования составляет более 50 млн. рублей в ценах 2007 года.

- Результаты исследований используются в учебном процессе в Ульяновском государственном техническом университете при обучении студентов и аспирантов.

Цикл работ по разработке и внедрению СИ в авиастроение отмечен Премией Министерства авиационной промышленности. Изобретения авторов занимали почетные места в областных конкурсах изобретений. Один из авторов книги был лауреатом Всероссийского конкурса «Инженер года 2004» Российской ассоциации научных и инженерных обществ и удостоен звания «Профессиональный инженер России».

Результаты исследований докладывались на технических советах Головного НИАТ (г. Москва 1986 – 1994 гг.), Всероссийской конференции «Математическое моделирование в машиностроении» (г. Куйбышев, 1990 г.), семинаре «Оборудование, технология и организация цехов по производству профильной продукции и ТНП» (г. Пенза, 1991 г.), отраслевом совещании МАП «Состояние и перспективы изготовления листовых профилей в изделиях отрасли» (г. Москва, 1992 г.), семинаре «Технологические проблемы производства летательных аппаратов и двигателей» (г. Казань, 1993 г.), конференции «Научные технологии товаров народного потребления» (г. Ульяновск, 1997), Всероссийской конференции «Ресурсосберегающие технологии листовой и объемной штамповки» (г. Ульяновск, 1997 г.), конференциях ППС УлГТУ в 1995 – 2004 гг, 3, 4 и 5 Всероссийских конференциях «Современные технологии в машиностроении» (г. Пенза, 2000, 2001, 2002 гг.), международной конференции «Технико-экономические проблемы промышленного производства» (г. Набережные Челны, 2000 г.), международной конференции «Автомобиль и техносфера» (г. Казань, 2003 г.), выездном заседании Головного Совета «Машиностроение» Министерства Образования РФ (г. Ульяновск, 2003 г.) и др.

Разработки выполнены на уровне мировых достижений в этой области. Технологии интенсивного формообразования получили золотую медаль «Ассоциации содействия развитию промышленности» в Париже в 2001 году за высокое качество продукции; в 2003 г. удостоены сертификата Парижской выставки «Сотрудничество во имя прогресса» (сертификат GPE 12/04 от 8 мая 2003 г

Разработки в области технологии интенсивного деформирования и оборудования для ее реализации были отмечены дипломами следующих выставок: 1) «Реконструкция и ремонт зданий и сооружений», 2-3 октября 2001 г., г. Самара; 2) «Строительные технологии», 22-24 мая 2001 г., г. Ижевск (диплом 3 степени); 3) 10 Международной выставки «Стройтех-2002», 25 февраля – 1 марта 2002 г., г. Москва; 4) «Строительство, отделочные материалы, дизайн», 18 – 21 апреля, 2002 г., г. Саратов; 5) 12 выставки «Жилище 21 века», 14 марта 2002 г., г. Волгоград; 6) 11 Международной выставки «Стройтех – 2003», 2 – 7 марта 2003 года, г. Москва; 7) Международной выставки «Стройтех – 2004», 24 – 28 февраля 2004 г., г. Москва, Сокольники; 8) Московской выставки «Доркомэкспо – 2004», 25 – 28 мая 2004 г., г. Москва; 9) «Строительный форум городского хозяйства», 16 июня, 2004 г., г. Воронеж; 10) 2-й Международной выставки «Авиакосмические технологии и оборудование», 10 – 13 августа, 2004 года, г. Казань.

Результаты исследований отражены в более чем 150 публикациях (книгах, статьях в центральных и региональных журналах и сборниках, трудах конференций, авторских свидетельствах и патентах).

Книга содержит семь разделов. В **первом** разделе рассмотрены вопросы применения профилей в различных отраслях, проведен технико-экономический анализ альтернативных методов изготовления профилей, применяемых материалов и дефектов профилей. Выполнен анализ применяемого оборудования. Проведен технологический анализ схем формообразования около 100 способов производства профилей. Здесь же проанализированы технологические и теоретические работы, посвященные процессам профилирования.

Во **втором** разделе даны классификаторы профилей по видам элементов жесткости, механических схем процессов и дефектов профилей, раскрывающие предмет исследования и разработки.

Третий раздел посвящен разработке математических моделей уголкового профиля, схем формообразования, зоны плавного перехода, образования кромочной волнистости, числа переходов, прогиба донной части профиля, формовки гофра, осадки заготовки и формирования продольной кривизны. Сформулирован критерий потери устойчивости, рассмотрен классификатор способов предотвращения кромочной волнистости.

В **четвертом** разделе описаны экспериментальные работы по верификации разработанных математических моделей, рассмотрены специальные приемы интенсификации процесса формообразования профиля, выявлены особенности изготовления профилей с покрытием, рифтами, а также перфорированных профилей.

Пятый раздел относится к разработке и расчетам профилегибочных станков и правильных устройств на основе проведенных в разд. 3, 4 исследований, также описано оборудование для производства гофра и вспомогательное оборудование, созданное с участием авторов.

Шестой раздел посвящен разработке технологии, где рассмотрены вопросы технологичности, выбора способа, схемы формообразования, расчетов заготовок, точности сечения, вопросов проектирования оснастки и особенности раз-

работки технологии производства специальных профилей. Представлен алгоритм разработки технологии, установлены оптимальные условия замыкания калибров роликов и технологические маршруты изготовления профилей и деталей.

В **седьмом** разделе рассмотрены технологические аспекты внедрения методов интенсивного формообразования, качество получаемой продукции, особенности внедрения оборудования, экономическая эффективность, использование результатов работы в учебном процессе, перспективы развития технологий профилирования.

Содержание и объем книги обусловлены стремлением авторов наиболее полно представить релевантные результаты собственных исследований в области профилирования и механики деформируемого твердого тела, их приложения, а также сделать ее полезной аспирантам и разработчикам технологии и оборудования, специализирующимся в данной области.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Применение гнутых тонкостенных профилей в отраслях народного хозяйства

Конструктивно гнутые тонкостенные профили обычно подразделяют на силовые несущие, ограждающие и декоративные малонагруженные. Основными потребителями их являются отрасли строительства, авиастроения, автомобилестроения, электротехнической отрасли и ряда других. Гнутые профили могут применяться в качестве элементов силового набора планера летательных аппаратов, декоративных или функциональных деталей салона, бамперов, стеклоподъемников, молдингов, стоек и декоративных элементов транспортных средств (автомобилей, вагонов, прицепов, речных и морских судов), ограждений, несущих и связывающих элементов, защитно-декоративных элементов облицовки зданий и сооружений (жилищное и промышленное строительство), элементов каркасной мебели, несущих деталей ангаров, складов, стеллажей, парников и теплиц, щитов электротехнических установок и т.д.

Функциональное назначение, конструктивные требования, а также характер и величина эксплуатационной нагрузки определяют типоразмер применяемого профиля, который может иметь форму уголка, швеллера, корытообразного, зетового, С-образного профили или же форму специального цельного или перфорированного профиля открытого или закрытого типа [1].

В настоящее время рынком профильной продукции востребованы профили различных типов с элементами жесткости [2], изготовление которых методами профилирования создает определенные сложности, в особенности, из материалов с покрытием. Применяемые для производства профилей в роликах материалы достаточно разнообразны: стали, алюминиевые и титановые сплавы, некоторые виды композиционных материалов, в том числе слоистые и армированные композиты, а также материалы с лакировкой, лакокрасочным или органическим покрытием.

1. Отрасль авиастроения

Впервые применение гнутых профилей в качестве несущих элементов, подкрепляющих обшивку планера летательных аппаратов, стало известно в 60 – 70 годы прошлого столетия [3]. Американские фирмы «Боинг», «Норд Америкэн», «Локхид» и «Дженерал Дайнэмикс» применяли гнуты профили типовой номенклатуры в конструкциях пассажирских и грузовых авиалайнеров (табл. 1.1) взамен прессованных профилей.

Замена прессованных профилей гнутыми из лакированного алюминия листа была обусловлена повышенной коррозионной стойкостью последних за счет лакирующего слоя, стойкого к действию фюзеляжного конденсата [4 – 6]. В этом случае ресурс сверхтяжелых и широкофюзеляжных самолетов возрастает с 20 – 30 тыс. часов до 50 – 60 тыс. часов [7]. Однако гнутые профили несколько уступают по несущей способности прессованным профилям, что обу-

словлено как свойствами материала (малый вклад плакирующего слоя в составляющую несущей способности), так и конфигурацией зоны сгиба [8]. Оптимальный выбор типа и размера профиля также играют значительную роль в максимизации весовой отдачи конструкции панелей, подкрепленных гнутыми профилями [9].

Повышение требований к экономичности авиационной техники вызвало необходимость снижения массы планера, которая в современных самолетах может достигать 26...28 % от их взлетной массы [3, 10].

Одним из путей снижения массы планера летательного аппарата является применение высокопрочных перспективных сплавов [11 – 20], среди которых можно выделить класс алюминиево-литиевых сплавов (1421, 1430, 1451 и др.) и титановых сплавов [21 – 25]. Последние применяются преимущественно в самолетах военного назначения. Так, в самолете-разведчике США UE-12 использование титана в расчете на общую массу планера составляло 95 % [26]. В конструкции аэробуса ИЛ-86 масса титана в планере составляла 45% [27].

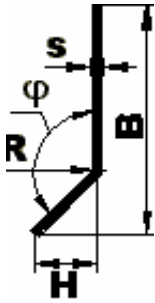
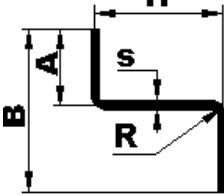
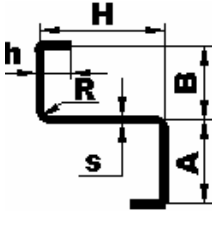
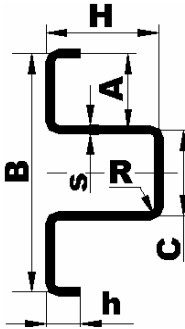
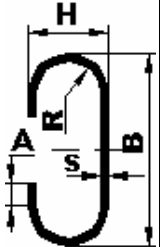
Совместные усилия конструкторов авиационной техники и технологов позволяют повысить эффективность технических решений за счет выбора оптимальной конструкции профиля и материала, причем, роль технологов заключается в создании эффективных технологических процессов производства гнутых тонкостенных профилей повышенной жесткости для условий мелкосерийного производства [27 – 32].

Отметим, что в совокупности, листовые профили, получаемые в рамках методами стесненного изгиба или интенсивного деформирования, которые обеспечивают достижение малых радиусовгиба и утолщений в угловых зонах, имеют значительные преимущества перед прессованными профилями:

1. повышенная коррозионная стойкость (в 1,5...2,5 раза выше, чем у прессованных) [4];
2. высокие прочностные характеристики вследствие упрочнения при деформировании и исходных свойств листового металла [15] (по сравнению с прессованными на 10 – 15 % выше);
3. стабильность механических характеристик по длине профиля [33 – 35] в отличие от прессованных профилей, у которых концевые участки могут оказываться рыхлыми из-за изменения режимов деформирования начального и конечного этапов по сравнению с устоявшимся режимом деформирования центральной части заготовки [36];
4. высокая точность размеров поперечного сечения;
5. относительная простота и невысокая стоимость изготовления [37, 38].

По сравнению с профилями из листа, полученными традиционным профилированием, гнутые профили, изготовленные стесненным изгибом (или интенсивным деформированием), имеют более высокую несущую способность (рис. 1.1), примерно на 10 – 12 % по критическим напряжениям на сжатие [39, 40, 34]. Сравнительные характеристики указанных видов профилей на кручение также свидетельствуют в пользу последних [41, 42].

Таблица 1.1.
Листовые профили, применяемые зарубежными авиастроительными компаниями

	Поперечное сечение	$A(j^0)$, мм	B , мм	C , мм	h , мм	H , мм	R , мм	s , мм
1		80-135	10-43	–	–	15-98	1,6-6,4	0,5-3,2
2		8-52	25-92	–	–	7-77	1,5-5,6	0,3-0,8
3		13-17	25-120	10-45*	4-13	13-100	1,0-8,6	0,5-2,3
4		6-25	36-126	16-48	4-22	22-64	2,3-7,1	0,6-2,6
5		1-13	8-35	–	–	10-22	4-11	0,5-1,3

В недавнем прошлом в отечественном авиастроении использовалось порядка 200 типоразмеров гнутых профилей из авиационных сплавов разнообразных поперечных сечений, приведенных в табл. 1.2 [3].

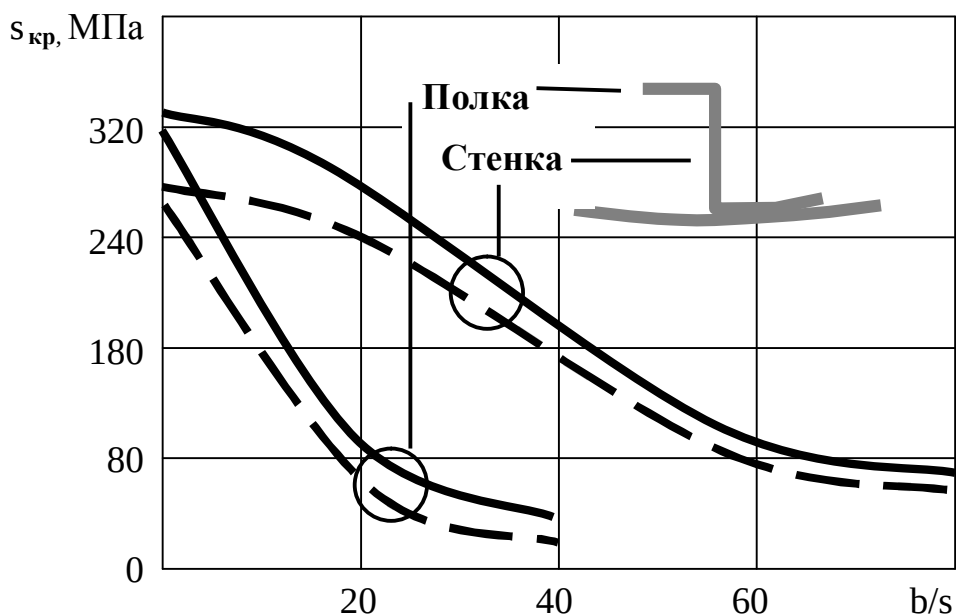


Рис. 1.1. Местная потеря устойчивости листовых профилей: изготовленных стесненным изгибом – сплошная линия; изготовленных обычной гибкой – пунктирная линия

Из указанных в табл. 1.1 профилей наибольшее применение находят профили толщиной от 0,8 до 1,5 мм (рис. 1.2 и 1.3).

Таблица 1.2

Применение гнутых профилей в авиастроении

Тип профиля	Количество типоразмеров	Годовой объем, пог. м
Уголок	155	316000
Зетовый	37	323500
Швеллер	56	20600
Корытный	47	474200
Специальный	5	2100

В настоящее время значительное количество деталей планера изготавливают из листового материала, профилированных и трубчатых полуфабрикатов. Номенклатура таких деталей для легкого самолета клепаной конструкции исчисляется тысячами, а для тяжелого – десятками тысяч [43, 3].

Например, общее количество разнообразных деталей из листов, профильных и трубчатых заготовок в конструкциях современных широкофюзеляжных самолетов может достигать 120 тысяч [44, 45]. До 48 % от общего числа мелких профильных деталей требуют дополнительных технологических операций: гибки по контуру, малковки, подсечки и др. Некоторые из этих операций могут быть совмещены с процессом профилирования [33].

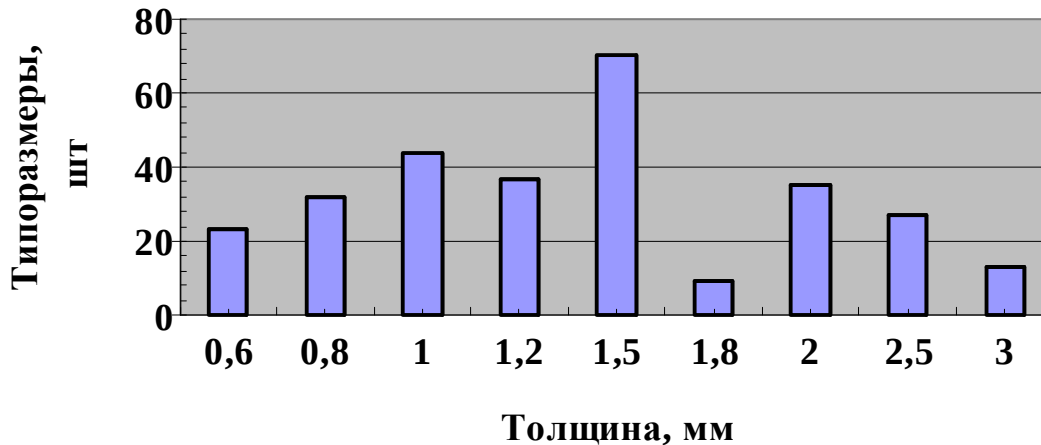


Рис. 1.2. Распределение типоразмеров применяемых профилей в авиастроении по толщинам

В последние 15 лет применение гнутых профилей листа было обусловлено разработками конструкторского бюро им. С.В. Ильюшина, АНТК им. А.Н. Туполева, ОКБ им. О.К. Антонова, ОКБ им А.С. Яковлева, ОКБ им. Г.М. Бериева, НПО «Молния», которые вводили в конструкция планера самолета гнутые профили из листа в качестве элементов стрингерного набора [46, 37, 38, 3]. Так, для самолета ИЛ-114, разработанного ОКБ им С.В. Ильюшина, «основной особенностью конструкции фюзеляжа является применение катаных из листа алюминиевого сплава стрингеров и шпалгоутов, что позволяет повысить технологичность конструкции, увеличить ее коррозионную стойкость и снизить массу по сравнению с конструкцией, использующей прессованные профили» [47]. При этом для самолета принята система эксплуатации по техническому состоянию без капитальных ремонтов в пределах назначенного ресурса – 30 тыс. летных часов; 30 тыс. посадок; 30 лет [48]. Благодаря прогрессивным решениям генеральных конструкторов ОКБ отрасли и технологическим разработкам на основе СИ и МИД, в настоящее время профили из листовых материалов, изготовленные методом стесненного изгиба (рис. 1.4), применяются в качестве стрингеров на самолетах Ил-103, Ил-114 [47], Бе-200, Ту-334, Ан-70 [37, 38].

В 2001 году между ОКБ им. С.В. Ильюшина и индийской компанией Hindustan Aeronautics подписано соглашение о совместном производстве мно-

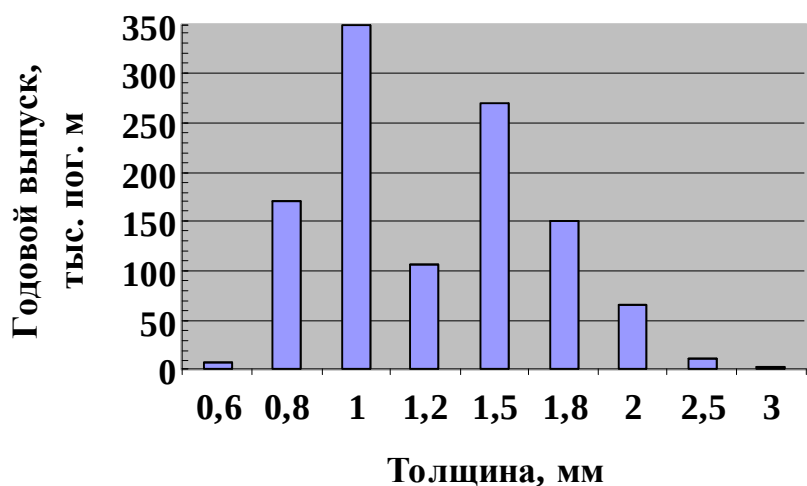


Рис. 1.3. Распределение объемов применяемых профилей в авиастроении по толщинам

гоцелевого самолета Ил-214 [49], для которого изучается вопрос использования гнутых профилей в силовом наборе планера.

Самолет Бе-200, будучи многоцелевым летательным аппаратом, выходит на отечественный и международный рынок. К 2003 году семь самолетов были приобретены Министерством по чрезвычайным ситуациям, а до 2011 г. предполагается закупка до 300 единиц для нужд Министерства лесного хозяйства и охраны береговых границ страны [50]. Ведутся переговоры с бразильской фирмой Embraer по совместному производству Бе-200 на латиноамериканском континенте [51].

Приведенное выше рассмотрение вопроса применимости прессованных и листовых профилей позволяет сделать вывод о том, что в ряде случаев использование гнутых профилей дает положительный эффект как в сфере эксплуатации летательных аппаратов, так и в технологии их производства. В этой связи создание технологий мелкосерийного производства высокоточных профилей повышенной жесткости для авиационной промышленности является решением актуальной народно-хозяйственной задачи.

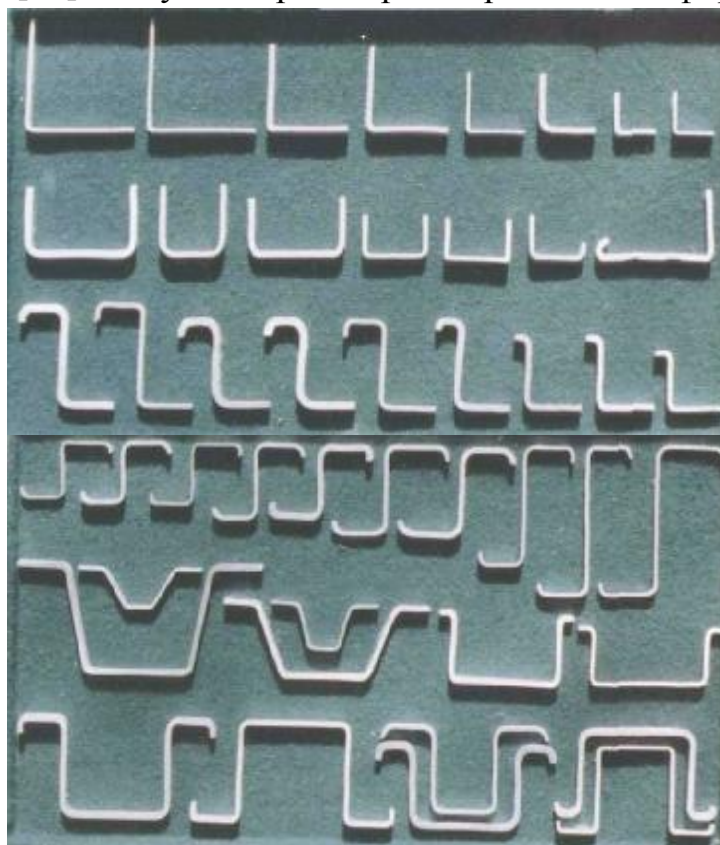


Рис. 1.4. Профили из алюминиевых сплавов, изготовленные методом стесненного изгиба

1.1.2. Отрасль автомобилестроения

Применение гнутых профилей в автомобильной промышленности в настоящее время является довольно значительным [21, 22]: пороги, окантовки дверей и окон, соединения панельных дверей, каркас и планки сидений, обоймы уплотнителя поворотного стекла, сточный желоб крыши и его облицовка, уплотнитель фланца задней двери, направляющие подлокотника, молдинги и многие другие детали наружной и внутренней отделки автомобилей (рис. 1.5).

В последнее время наметился рост использования высокотехнологичных материалов с покрытием [52 – 56], которые находят широкое применение в зарубежном автомобилестроении при производстве кузовов и профилей для отделки узлов автомобиля [57 – 60]. В легковых автомобилях отечественного производства применяют около 200 типоразмеров различных гнутых профилей (табл. 1.3), преимущественно из материала с покрытием [61].

С 1990 г. выполняются разработки технологии производства гнутых профилей для автомобилестроения [38, 62]. Так, были освоены технологии производства труб, профилей для порогов, молдингов, съемных багажников, С – образных профилей с толщиной стенки от 1,5 до 2,0 мм с продольной кривизной, используемых в стеклоподъемниках автомобиля УАЗ (табл. 1.4). За последние два года освоены также технологии изготовления трех типов бамперов для автомобилей семейства ВАЗ, ряда деталей автобуса ПАЗ и др.

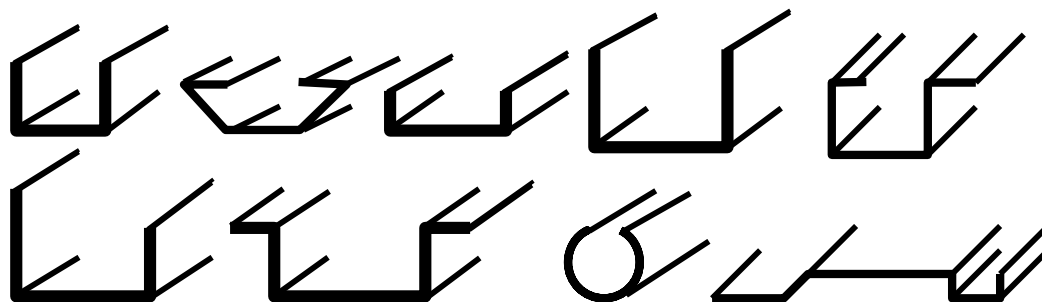


Рис. 1.5. Профили, применяемые в автомобилестроении

Таблица 1.3

Применение гнутых профилей в автомобилестроении

Марка автомобиля	Количество применяемых типов гнутых профилей
«Волга»	Около 30
«Чайка»	Около 40
«Жигули»	Около 20
«Москвич»	Около 40
«УАЗ»	Около 30

Характерной особенностью требований к профильным деталям в автомобилестроении – жесткие допуски их изготовления, что дает определенные преимущества процессам профилирования.

Таблица 1.4

Размерные параметры изготавливаемых деталей

Марка автомобиля	Длина, мм	Радиус продольной кривизны, мм
ВАЗ-2108	515	1382±75
ВАЗ-2109	510/315	То же
ВАЗ-2111	483	То же
ВАЗ-2110	765	То же
УАЗ	590/457	3222+30

Тем не менее, существует проблема сложности внедрения технологий профилирования в эту отрасль с устоявшейся организационно-производственной структурой автомобильных заводов. Во-первых, технология должна быть сертифицирована, во-вторых, существует жесткая конкуренция на

рынке технологий для этой отрасли, что обусловлено массовым производством деталей в ней, в-третьих, смена поставщика создает определенный риск временного приостановления поточного производства.

С другой стороны, появление новых материалов с покрытием, частая смена модельного ряда автомобилей, широкий рынок сферы сервисного обслуживания и продажи запчастей приоткрывают значительные возможности для технологий интенсивного деформирования профилей в роликах с высокой степенью автоматизации производственных процессов.

По недавней оценке [61], необходимый сортамент профилей для отрасли автомобилестроения — более 500 профилирумеров; 80 % из них — специальные гнутые профили, производство которых может представлять определенные проблемы для производств, ориентированных на гибку в штампах или гибочных машинах.

1.1.3. Строительная индустрия

К настоящему времени в строительной индустрии наблюдается настоящий бум потребления профильной продукции. Хотя в России удельное потребление стали почти в пять раз меньше, чем в странах Европейского союза, и в 1,5 раза ниже, чем мировой уровень удельного потребления [63], на российском рынке наблюдается появление новых фирм-производителей и продавцов профильной продукции. В качестве примера можно привести ЗАО «Аркада» (г. Смоленск, производитель и разработчик технологии и оборудования), фирму «Венталл» (г. Обнинск), ЗАО «Ranilla Taldom» (г. Москва, дилер одноименной финской фирмы), ООО «Караджа-Ро» (г. Москва, дилер фирмы «Lindab AB»), компанию «Roof Expert» (г. Москва, дилер одноименной шведской фирмы), фирму «Руф Интер» (г. Москва, дилер шведской фирмы КАМІ), промышленную компанию «Металл Профиль» (г. Москва), ООО «Евролайн Вест» (г. Санкт-Петербург, дилер фирмы Weckman), фирму «Московский центр кровли».

Указанные выше предприятия производят большое количество профилей широкой номенклатуры: коньки крыш, противовеетренные уголки, воронки, подоконники, дождевые стоки, а также соединительные элементы, детали герметизации, снегозащиты и т.п. [61].

Гнутые профили в строительстве применяют также в конструкциях подпорок стен, перегородок, сборных панелей, подвесных потолков, заборов и т.п. [64]. По анализу рекламных материалов фирм, их прайс-листов в Интернет выявлено, что наибольшее распространение имеют широкополочные профили швеллерного, С-образного, корытного типа, а также специальные профили разнообразных сечений, в основном, с покрытиями различных видов (рис. 1.6).

По действовавшим до 1983 года ГОСТам в настоящее время изготавливается лишь незначительное количество профильной продукции, что связано с существенным пересмотром номенклатуры гнутых профилей. Например, 15 предприятий созданной в 2002 году Национальной ассоциации производителей стальных гнутых профилей (НАПСГП), выпускающих холодногнутые профили из оцинкованной стали для строительства, используют только один ГОСТ на

гофрированные профили (1994 года выпуска) [65], а вся основная номенклатура профилей выполняется на основе 28 технических условий [66].



Рис. 1.6. Применение профилей с покрытием в строительстве

ОАО «Челябинский завод профилированного стального настила» выпускает профилированные листы повышенной жесткости согласно ГОСТ [65], а также профили для арочных покрытий и настилов покрытий и стен (рис. 1.7) согласно [67, 68] размером до 330x136 мм и толщиной стенок от 0,8 до 1,2 мм.



Рис. 1.7. Профили для арочных покрытий и настилов

Компания «Маяк» (г. Самара) производит швеллеры, уголки, Z-образные и специальные профили, а также сайдинг, подвесные реечные потолки, металлочерепицу (рис. 1.8).

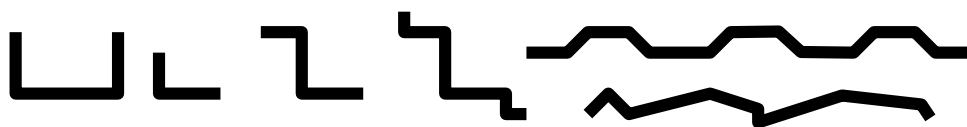


Рис. 1.8. Профили компании «Маяк»

Компания «Стальинвест» (г. Москва) выпускает гофрированные панели с толщиной стенки от 0,5 до 0,7 мм, сайдинг, водосточные системы, доборные элементы, а также профили для обрешетки и кровли толщиной от 0,5 до 1,0 мм и высотой до 40 мм (рис. 1.9) в соответствии с утвержденными ТУ[69].

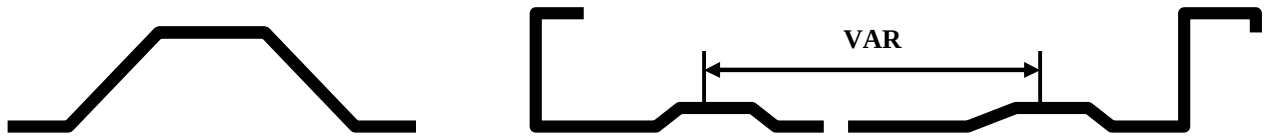


Рис. 1.9. Профили обрешетки и кровли компании «Стальинвест»

Группа компаний «Стройпромет» (г. Сходня М.О.) производит 7 видов сайдингов шириной от 216 до 502 мм из стали толщиной 0,5 мм (с покрытием) преимущественно на станках фирмы «KNUDSON». Кроме того, предприятия «Стройпромет» выпускают софиты, стеновые панели, водосточные желоба и профили повышенной жесткости (рис. 1.10) по согласованным ТУ [70]. Толщина стенок профилей повышенной жесткости – от 0,8 до 1,2 мм.

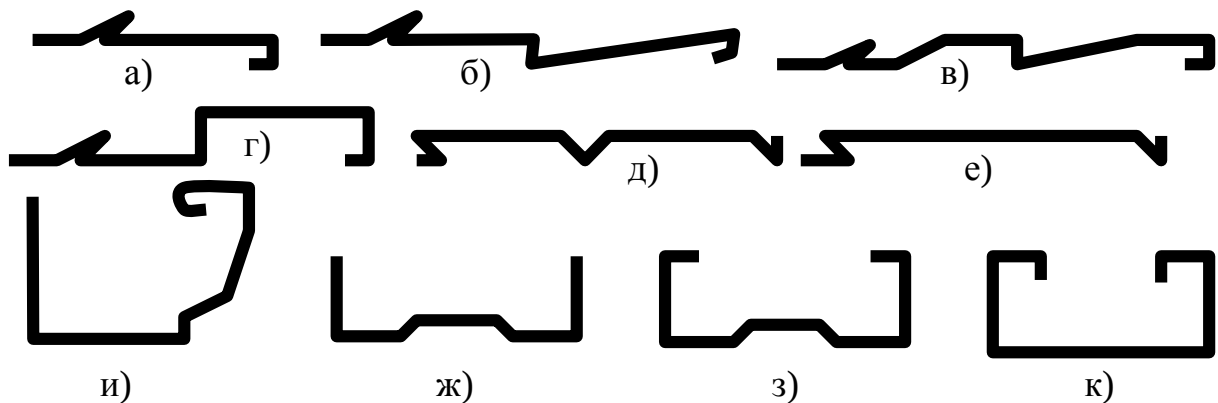


Рис. 1.10. Профили «Стройпромет»: а-г – сайдинги; д – софит; е – стеновая панель; и – водосточный желоб; ж, з – профили повышенной жесткости несущего каркаса панелей

ЗАО «АЛАР-2» (г. Москва) изготавливает профили толщиной 0,6 – 2,0 мм швеллерного, С-образного и Σ -образного сечений высотой до 50 мм и шириной до 250 мм по согласованным ТУ [71, 72]. Аналогичную номенклатуру профилей выпускают ООО «ИНГУС» (г. Ижевск) по ТУ [73] и ООО «ВЕНТАЛЛ» (г. Обнинск) по ТУ [74, 75], причем, номенклатура профилей последнего предприятия по швеллерным профилям составляет – 35 типоразмеров, по С-образным – 33 типоразмера, по профилям повышенной жесткости – 26 типоразмеров.

Профили для фахверка и перегородок производит ООО «ЛМЗ-металлоцентр» (г. Лысьва Пермской обл.) по техническим условиям [76, 77] с



Рис. 1.11. Профили повышенной жесткости ООО «ЛМЗ-Металлоцентр»

продольными элементами жесткости (рис. 1.11). Толщина стенок профилей – от 0,55 до 0,7 мм, высота – до 50 мм.

Номенклатура профилей ЗАО «Аркада» (г. Смоленск) является наиболее разнообразной и включает стоечные, декоративные, армирующие, дверные профили и ряд других (рис. 1.12), исполняемых в соответствии с ТУ [78].

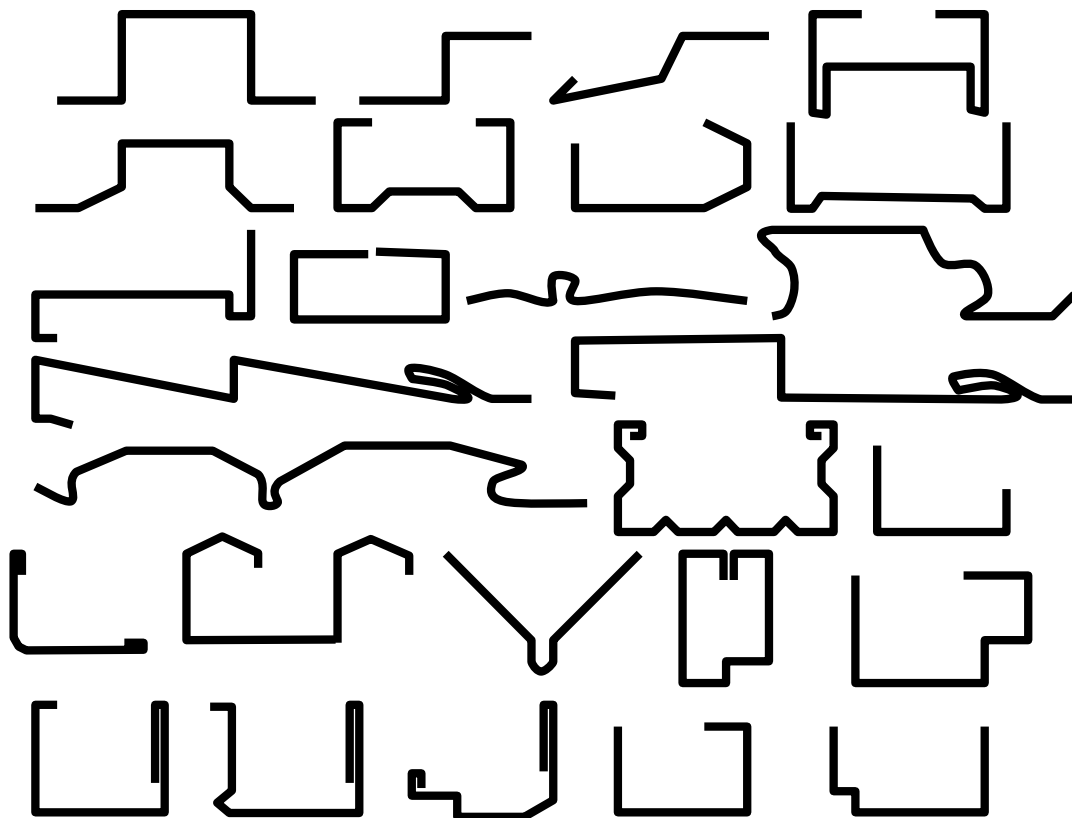


Рис. 1.12. Профили, освоённые ЗАО «Аркада»

ОАО «Ульяновский НИИТ» освоило несколько сот типоразмеров профилей для строительства: несущие элементы каркасных строений, кровельные детали, декоративные элементы отделки интерьера помещений ((рис. 1.13), водостоки, панели облицовки зданий (рис. 1.14)). Для значительного количества типоразмеров профилей выполнены исследования, позволившие внедрить технологические решения и соответствующее оборудование [37, 38].

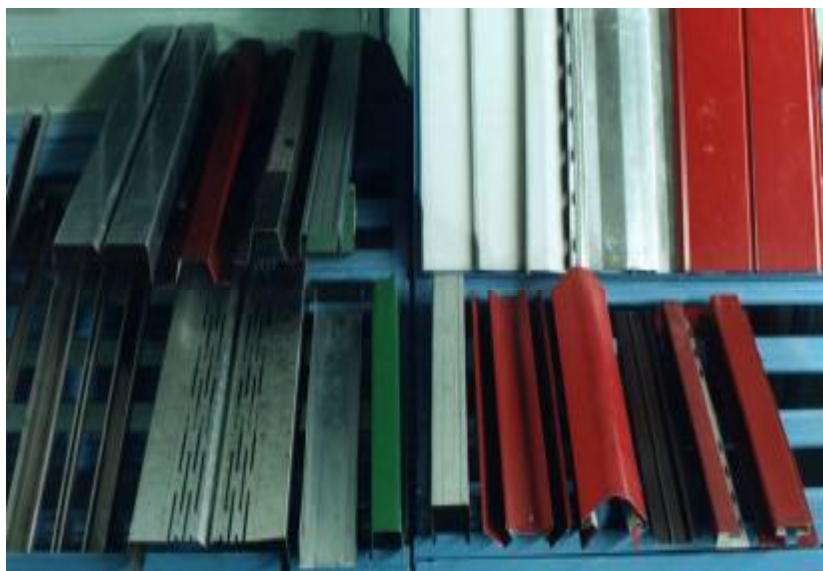


Рис. 1.13. Строительные профили, изготовленные по технологии ОАО «Ульяновский НИИТ»

Динамично развивающиеся компании ООО «Спецтехнология» и ООО «НПО «ИДМ» ежегодно осваивают до 100 типоразмеров различных профилей. На отечественный рынок этими фирмами ежегодно поставляется до 15 автоматизированных линий производства профилей и гофр девяти типов, а также несколько раскройных комплексов и отдельных видов вспомогательного оборудования.

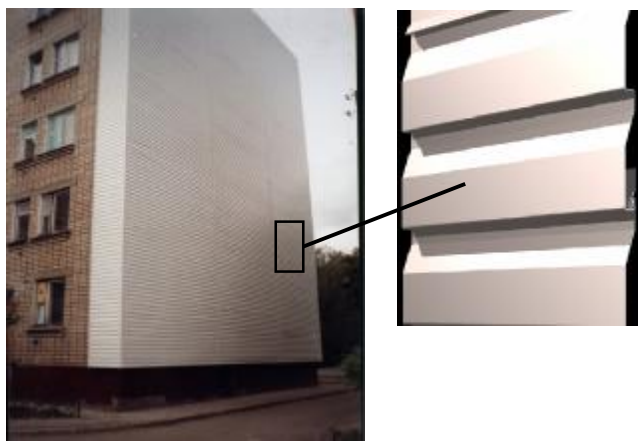


Рис. 1.14. Применение специальных гнутых профилей для облицовки жилых домов



Рис. 1.15. Образец профиля дорожно-го ограждения

Гнутые профили волнообразной формы сечения с толщиной стенки более 3 мм применяются для дорожного ограждения (рис. 1.15), профили замкнутого и полузамкнутых сечений – для различного вида других ограждений, элементов разборных строительных лесов и т.д.

1.1.4. Каркасное строительство и складское хозяйство

Развитие торговли и малого бизнеса породило спрос на перфорированные профили [79, 80], которые широко используются для каркасного строительства (рис. 1.16) и оснащения складских помещений (рис. 1.17 и 1.18). Перфорированные гнутые и гофрированные профили применяют также для строительства складов-ангаров, пунктов ремонтно-технических станций в сельских районах.

Преимущества стеллажей из перфорированных профилей [81, 82]:

1. возможность изменения междуполочной высоты стеллажей, что особенно важно при неустойчивой номенклатуре хранимых грузов;
2. высокая прочность и жесткость получаемых конструкций;
- легкость монтажа и демонтажа;
3. сравнительно невысокая стоимость их изготовления.

Гнутые профили различных типоразмеров и в предшествующие десятилетия находили широкое применение в складском хозяйстве нашей страны для монтажа разнообразных видов стеллажей (табл. 1.5).



Рис. 1.16. Каркасная теплица из профилей

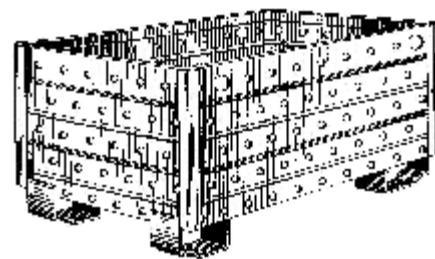


Рис. 1.17. Производственная тара из перфорированных профилей для горячих цехов

В последнее десятилетие наблюдается значительный уклон в сторону применения тонкостенных профилей, преимущественно с покрытием [3]. Широко известно торговое оборудование для современных супермаркетов и торговых комплексов различных немецких, китайских, французских и шведских компаний. Российские компании отчасти решают вопросы технологии производства конструктивных элементов, но, к сожалению, не вопросы проектирования цельных изделий на уровне крупных проектов для тиражирования.



Рис. 1.18. Сборно-разборный стеллаж

Таблица 1.5

Типы сборно-разборных стеллажей [81]

Наименование стеллажа	Габаритные размеры секции стеллажа, мм			Назначение
	ширина	глубина	высота	
Тяжелые и средние стеллажи				
Каркасный	950-18000	500-800	2500-10000	Для грузов, уложенных на поддонах, при необходимости свободного доступа к каждой единице груза
Гребенчатый	950-1800	500-800	2500-8000	Для упакованных грузов
Сквозной	1320	до 6000	3200-10000	Для хранения крупных партий однородных грузов на поддонах, в отсутствие необходимости доступа к каждой единице груза

Наименование стеллажа	Габаритные размеры секции стеллажа, мм			Назначение
	ширина	глубина	высота	
Для длинномеров	900-4000	900-4000	2500-4000	Для хранения длинномерных материалов
Полочный	950-1320	500-680	2500-4000	Для мелких партий груза без использования поддонов
Для мелкой тары	340-670	500-680	2500-4000	Для размещения тары с грузом вручную или погрузчиком
Легкие стеллажи				
Полочный кар-касный	936-1152	306-378	1600-2000	Для многономенклатурных грузов
Для мелкой тары	1008-1368	378-666	1600	Тару навешивают или устанавливают в ячейку

Наряду с этим, имеются и значительные технологические проблемы изготовления профилей из материалов с покрытием: для тонкостенных профилей характерна потеря устойчивости широких элементов и повреждение поверхности у многоэлементных профилей и профилей с элементами двойной толщины; для профилей с толщиной стенки более 1,5 мм характерно нарушение слоя покрытия вследствие больших контактных напряжений. Кроме того, сложные профили обычно имеют склонность к приобретению различного вида поволодок.

1.1.5. Сельскохозяйственное машиностроение

В сельскохозяйственном машиностроении гнутые профили находят применение в различных прицепных и самоходных комбайнах, косилках, культиваторах, сеялках, плугах, стогометателях, зерноочистительных и картофелеуборочных машинах, машинах для животноводческих ферм, тракторных прицепах различной грузоподъемности и назначения. Например, для изготовления лонжерона самоходного шасси Т-16М применяются корытные профили 34x15x37x2 мм, 30x8x18x2 мм и специальный профиль 102x15x3 мм [22].

Развитие технологии производства гнутых профилей для модульного строительства дает возможность создавать передвижные участки профилирования, размещенные на трейлерах и имеющие в своем составе передвижные электростанции. Производство становится более мобильным, необходимая номенклатура профилей изготавливается на местах в отдаленных сельских районах, чем достигается снижение затрат на транспортировку профилей, устраняется необходимость продолжительного хранения профильной продукции.

1.1.6. Вагоностроение

В вагоностроении гнутые профили позволяют получать совершенно новые конструктивные решения по отдельным узлам и элементам вагонов со снижением трудовых затрат на их изготовление при высоких прочностных характеристиках. В конструкции четырехосных цельнометаллических вагонов около 25% его массы составляют гнутые профили, что позволяет создать полувагон с высокими эксплуатационными качествами и эстетичным, современным

внешним видом. Стоимость изготовления вагона из гнутых профилей по сравнению с аналогичными штампованными снижается на 5-10 % [22].

1.1.7. Судостроение

В судостроении гнутые профили с толщиной стенок до 3 мм применяют в конструкциях судов преимущественно небольшого водоизмещения (до 10 – 15 тонн) – теплоходов, траулеров, танкеров, катеров и барж – в качестве ребер жесткости, стоек, бимс, шпангоутов, планширов. Например, на судостроительном заводе «Красное Сормово» (Нижний Новгород) элементы переборок выполняют из уголков 60х30х2,5 мм, фальшборта буксира – из швеллера 40х20х2,5 мм, привальные брусья – из С – образных профилей [22]. В последние годы применяют большое количество декоративных элементов для отделки кают, проходов и палубных надстроек.

1.1.8. Электротехническая промышленность

В электротехнической промышленности применяют уголкового, швеллерные и корытные профили для изготовления электрощитов, шкафов низковольтной аппаратуры, ребер жесткости трансформаторов, элементов передвижных электростанций при сокращении расхода металла до 10% по сравнению с использованием для этих целей горячекатаных профилей [22].



Рис. 1.19. Обобщающая схема применения гнутых профилей

Сферы применения гнутых профилей в народном хозяйстве представлены в обобщающей схеме рис. 1.19.

1.1.9. Эффективность применения гнутых профилей

Как указано ранее, в авиастроении экономическая эффективность применения гнутых профилей достигается за счет увеличения ресурса планера самолета и повышения несущей способности панелей, связанной с уменьшением радиуса гиба, что дает двойной эффект: повышение собственной жесткости профиля и улучшение условий крепления профиля к листам, образующим контур фюзеляжа, ввиду увеличения площади поверхности контакта профиля и листа.

В других отраслях промышленности экономический эффект достигается за счет экономии материала и сокращения технологических и организационных затрат (рис. 1.20).

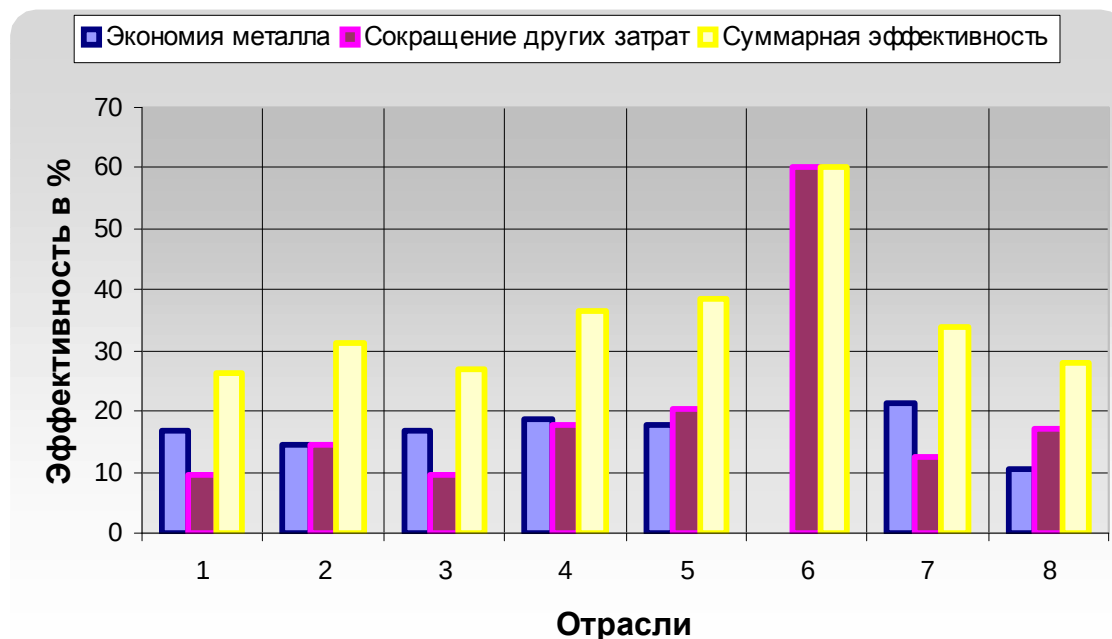


Рис. 1.20. Эффективность применения гнутых профилей в расчете на стоимость 1 т материала в различных отраслях: 1 – автомобилестроение; 2 – тракторное и сельскохозяйственное машиностроение; 3 – тяжелое и транспортное машиностроение; 4 – строительное, дорожное и коммунальное машиностроение; 5 – строительство; 6 – судостроение; 7 – машиностроение легкой промышленности; 8 – прочие отрасли

Экономическая эффективность применения гнутых профилей в зависимости от типа профиля приведена на рис. 1.21 согласно работе [83].

Эффективность применения гнутых профилей, приведенная на рис. 1.20 и 1.21 согласно работе [83], в своей основе имеет сравнение с применением пресованных профилей и профильных деталей, получаемых альтернативными методами их изготовления. В наше время промышленной децентрализации сделать аналогичную оценку на национальном уровне не представляется возможным, однако такая оценка неизбежно проводится при принятии технологических и организационных решений на уровне отдельных проектов. Наличие мощных прикладных программ, например, Project-7 [84], позволяет рассматри-

вать различные варианты и производить оптимальный выбор, основываясь на тех или иных критериях оптимальности.

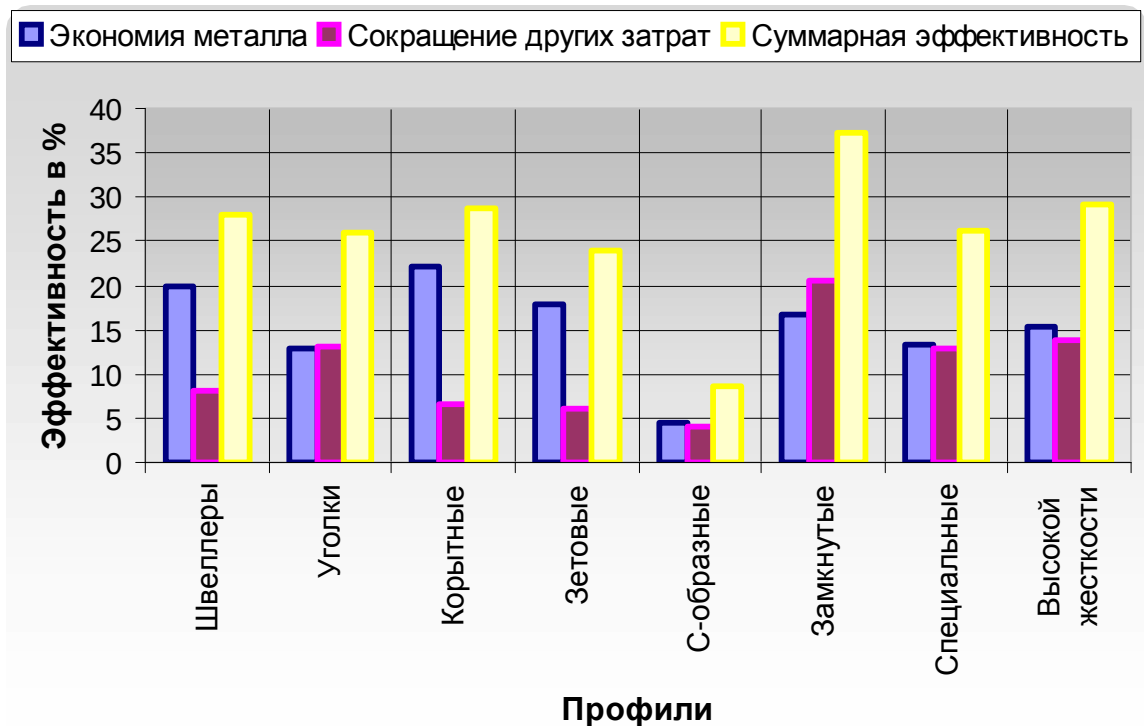


Рис. 1.21. Эффективность применения гнутых профилей в расчете на стоимость 1 т материала по группам профилей

С технологической точки зрения выбор оптимального решения по производству профильной детали представляет собой выбор подходящего метода или способа ее изготовления. У технолога такой выбор ассоциируется с принятием или отвержением определенных альтернатив, зависящих от уровня оснащенности предприятия или банка известных ему методов и способов производства требуемых профильных деталей.

1.2. Альтернативные технологии производства гнутых профилей

Гибку профилей из ленты и листовых заготовок можно производить различными методами (рис. 1.22). Обладая определенными достоинствами и недостатками, эти методы изготовления профилей имеют свои области применения и различную экономическую и технологическую эффективность [61]. Выбор метода производства гнутого профиля зависит от его типоразмера, требований к нему и имеющегося на предприятии или приобретаемого оборудования, что определяет технологическую эффективность. Учет организационных мер, конъюнктуры рынка и других сопутствующих факторов позволяют оценить и экономическую эффективность.

1.2.1. Гибка в кромкогибочных устройствах

Применение кромкогибочных машин с поворотной траверсой (рис. 1.22, блок 1) для изготовления гнутых профилей дает возможность изготовления широкополочных профилей без потери устойчивости полок [85]. Современные кромкогибочные устройства имеют весьма широкие технологические возмож-

ности изготовления профилей со значительным числом зон сгиба при использовании различного вида ограничителей, фасонных оправок и прижимов [86]. Для производства длинномерных профилей относительно простого сечения немецкая фирма МАТ разработала три типа автоматизированных гибочных машин, рассчитанных на гибку профилей длиной 3100, 3800 и 4300 мм [85].

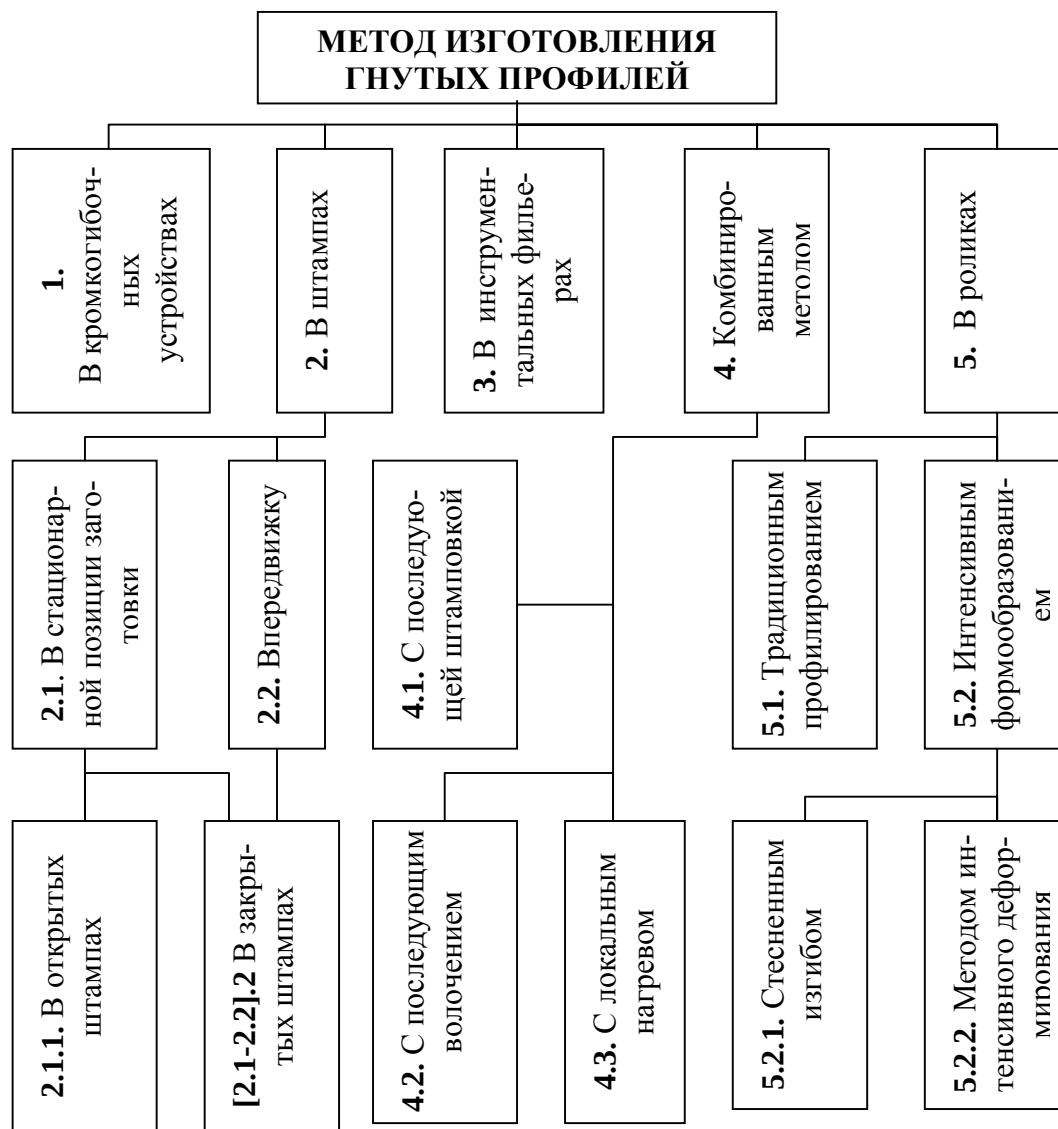


Рис. 1.22. Классификатор методов изготовления гнутых профилей

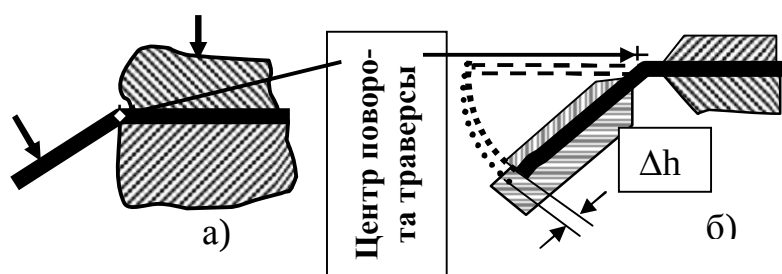


Рис. 1.23. Гибка профиля в кромкогибочных машинах: а) – свободная гибка; б) – стесненный изгиб

Указанные виды кромкогибочных устройств допускают изготовление профилей с радиусомгиба больше допустимого, однако были разработаны кромкогибы, позволяющие влиять на геометрию угловой зоны профиля за счет приложения торцевого поджатия совместно с изгибающим

моментом (рис. 1.23). В результате возможно уменьшение радиусагиба до весьма малых значений (существенно меньших допустимого радиусагиба) при наличии утолщения в угловой зоне. Данная схема деформирования (по сути метод) впервые была предложена Г.В. Проскуряковым [39, 40] и названа «стесненным изгибом», хотя в дальнейшем это название закрепилось за разнообразными процессами деформирования заготовок с применением различного технологического оснащения, в том числе роликов, где происходит осадка предварительно сформованной волнообразной заготовки.

В кромкогибах, реализующих схему «стесненного изгиба» [87, 88], приложение торцевой сжимающей силы происходит благодаря более короткой, чем при обычной гибке, траектории перемещения концевой части заготовки (см. рис. 1.23-б). С этой целью ось вращения устройства смещают в полуплоскость, противоположную той, где происходит движение поворотных элементов устройства [87]. Технологический процесс изготовления профиля [88, 3] заключается в подгибке концевой части заготовки или же посредством выполнения нескольких перегибов с перемещением заготовки в направлении, перпендикулярном линиигиба (рис. 1.24).

Формообразование на кромкогибочной установке может рассматриваться как два этапа деформирования. На первом этапе усилие торцевого поджатия растет незначительно, набора утолщения в зоне сгиба практически не происходит. При этом зона сгиба ограничена прижимными планками. На втором этапе деформирования зона сгиба сокращается вследствие уменьшения радиусагиба. На данном этапе величина укорочения траектории движения торца заготовки достаточна для набора материала в зоне сгиба. Уголгиба, при котором наблюдается переход первой стадии во вторую, зависит от величины смещения оси вращения подвижного корпуса.

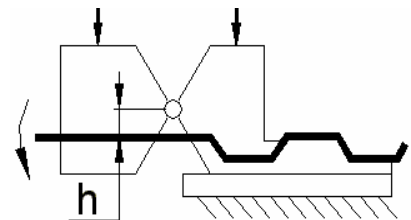


Рис. 1.24. Гибка гофр в кромкогибе

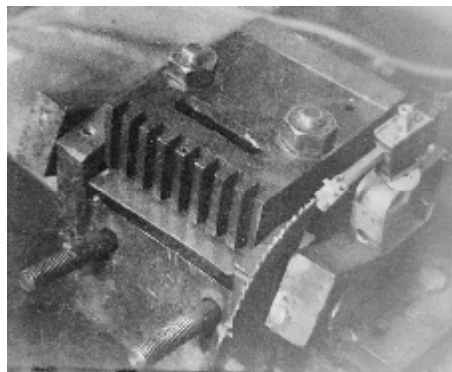
Наряду с кромкогибами, осуществляющими стесненный изгиб за счет кинематической схемы, были предприняты попытки создания кромкогибочных устройств, в которых тангенциальное усилие поджатия обеспечивалось гидроцилиндрами [89, 90].

Устройства данного типа не получили широкого распространения в связи с их ограниченными технологическими возможностями (допустимая номенклатура профилей – уголкового, швеллерного и корытообразные профили с минимальной шириной полок и стенок, определяемой размерами прижимных планок). Кроме того, возможны перекосы упорных планок при ширине рабочих поверхностей более 500 мм.

Экспериментальные кромкогибочные устройства с гребенчатыми планками (рис. 1.25) применялись для формообразования композиционных материалов волокнистой структуры системы «алюминий-сталь» [91] и слоистых композитов типа «Алор-41» [17] с целью выявления принципиальных возможностей стесненного изгиба. Результаты исследований показали эффективность

применения данных устройств для формирования угловой зоны повышенной жесткости.

Применение кромкогибочных устройств имеет следующие недостатки:



- высокая стоимость специализированного оборудования;
- относительно низкая точность получаемых деталей;
- ограниченные технологические возможности (сравнительно небольшая длина профиля и весьма ограниченный состав типоразмеров профилей по сечению);
- низкая производительность [61].

Рис. 1.25. Кромкогиб с гребенчатой прижимной планкой

С другой стороны, применение кромкогибочных устройств для экспериментальных исследований является очень удобным в связи с тем, что при одноугловой гибке оно позволяет изменять угол гибки и усилия поджатия, определяющие геометрию зоны сгиба. Возможность управления процессом и непосредственного наблюдения его протекания делает данный способ формообразования весьма ценным для экспериментального изучения еще и потому, что он осуществляется без промежуточного, «избыточного» деформирования, характерного для процессов профилирования. К тому же не требуется специальной оснастки, как это имеет место при изготовлении профилей в штампах. В то же время результаты исследования могут быть до известной степени распространены и на другие виды формообразования стесненным изгибом [90, 33].

Кроме того, кромкогибочные устройства специальных конструкций, как было указано выше, являются едва ли не единственным видом устройств, позволяющих производить гибку на малые радиусы [92] (порядка одной – двух

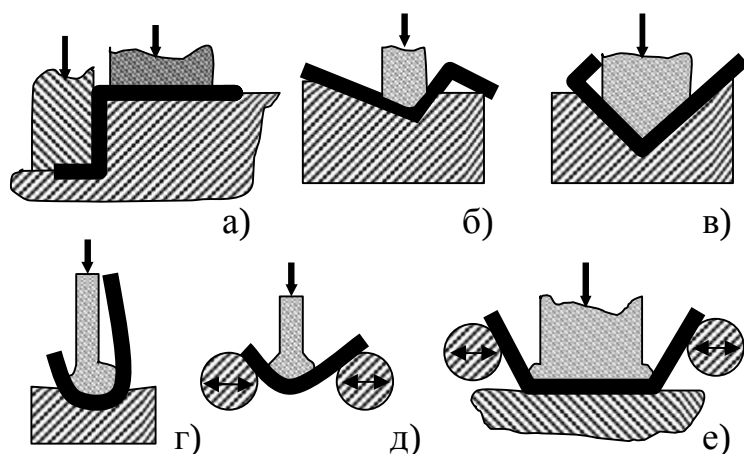


Рис. 1.26. Схемы гибки профиля в открытых штампах: а) – отгибкой; б, в, г) – движением пуансона в полость жесткой цельной матрицы; д) – движением пуансона между регулируемыми цилиндрическими оправками; е) – движением пуансона между регулируемыми оправками с созданием противодействия

толщин исходного листа) композиционные листовые материалы (слоистые композиты, материалы, армированные волокнами, многослойные и дисперсноупрочненные композиты) [93 – 95].

1.2.2. Изготовление гнутых профилей в штампах

Гибка профилей в штампах (рис. 1.22, блок 2) может осуществляться при стационарной позиции заготовки (блок 2.1) или вперемешку (блок 2.2). Гибка при стационарной позиции заготовки в **открытых** штампах

[96 – 100] допускает разнообразные схемы (рис. 1.26).

Хотя гибка в открытых штампах, вообще говоря, не позволяет получение радиусагиба меньше допустимого, тем не менее, известен способ [101], в котором уменьшение деформаций растяжения наружного контура происходит за счет одновременного изгиба нескольких заготовок (рис. 1.27). При этом минимальный радиусгиба зависит от величины угла пуансона, количества заготовок и размера матрицы (рис. 1.28). В данном процессе наличие трения и обжатие заготовок приводит к возникновению неравномерно распределенных по толщине листа усилий тангенциального сжатия. Разновидностью описанного способа гибки является гибка с радиальным противодавлением (рис. 1.29), где уменьшение деформаций наружного контура зоны сгиба достигается за счет давления выталкивателя [102]. При этом с увеличением противодавления предельный радиусгиба уменьшается.

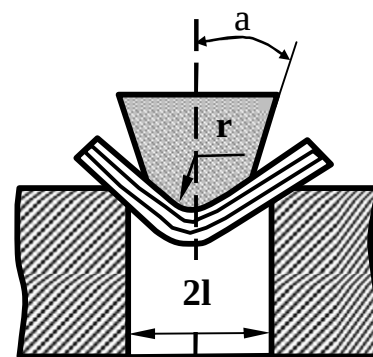


Рис. 1.27. Одновременный изгиб нескольких заготовок

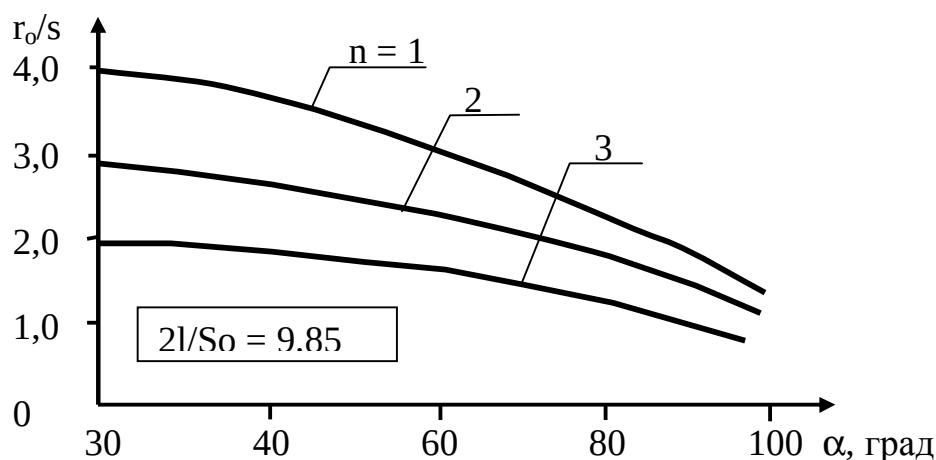


Рис. 1.28. Зависимость минимального радиуса от основных параметров процесса: n – число заготовок

В работе [103] предлагается первоначально формировать заготовку с углом и радиусом больше заданных по «обратной» схеме, а затем производить разгибку ее донной части с одновременным уменьшением радиуса за счет приложения дополнительных тангенциальных усилий сжатия. Использование данного способа позволяет получать утолщение в зоне сгиба, если не происходит потери устойчивости вертикальных стенок.

При изготовлении профилей с периодическими гофрами в открытых штампах [104, 105] плоская заготовка

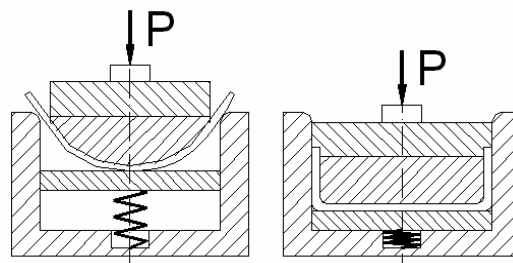


Рис. 1.29. Гибка профиля с радиальным противодавлением

предварительно изгибается на большой радиус ($r > 5s_0$), а затем, при создании дополнительных сжимающих усилий, осуществляется изгиб с малым относительным радиусом (рис. 1.30). В работе [104] процесс изгиба осуществляется за несколько переходов с последовательным уменьшением радиуса гибки.

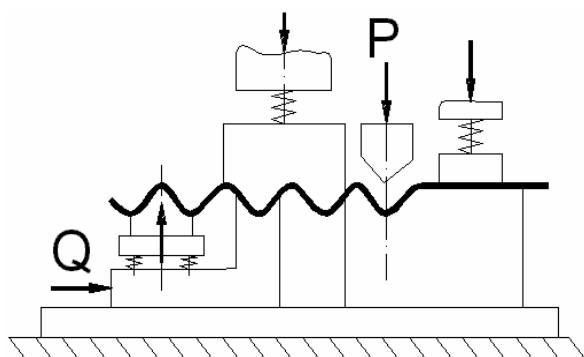


Рис. 1.30. Изготовление профилей с гофрами в открытом штампе

В работе [105] для осадки криволинейных поверхностей в матрице или пуансоне предусмотрен один уклон 1/1000 для сжатия заготовки и выпрямления её криволинейных поверхностей.

Недостатком гибки в открытых штампах является низкая точность деталей,

ограниченные технологические возможности процесса как в отношении длины, так и поперечного сечения профиля, а также низкая производительность процесса производства [61]. В указанных процессах существенного повышения жесткости угловой зоны профиля, вообще говоря, не достигается.

Формообразование профилей при стационарной позиции заготовки в **закрытых** штампах (рис. 1.22, блок 2.1.2) обеспечивает возможность получения утолщения в угловой зоне, однако при этом могут появляться дефекты, связанные с особенностями формообразования. Так, в схеме формообразования профиля с торцевым поджатием [106] возможна потеря устойчивости осаживаемой полки вблизи зоны сгиба (рис. 1.31-а). При формовке эластичной средой (рис. 1.31-б) дефекты формы могут и не наблюдаться, однако существуют проблемы базирования заготовки и обеспечения точности размеров элементов детали по ширине [107]. Использование эластичных сред расширяет технологические возможности изготовления деталей небольшой длины с прямолинейными и криволинейными бортами выпуклой или вогнутой формы. При формовке за один-два перехода возможна гибка на радиус, равный толщине заготовки при наборе утолщения в угловой зоне до 8...23 % и пружинении менее 1° [108].

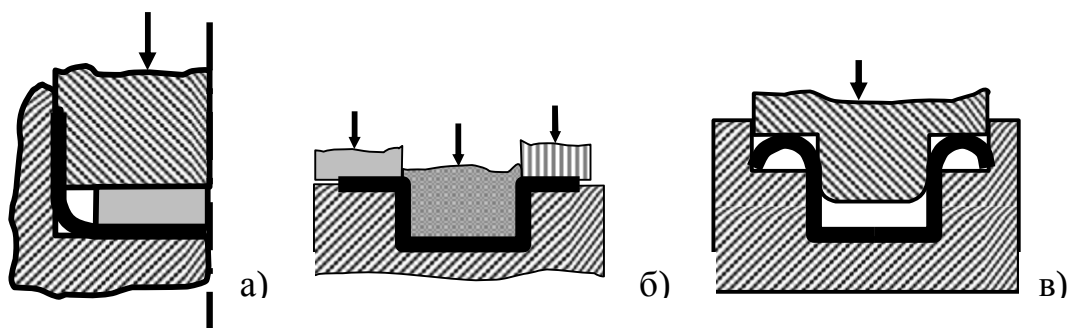


Рис. 1.31. Схемы гибки профиля в закрытых штампах: а) – схема с торцевым поджатием; б) – формовка эластичной средой; в) – осадка волнообразной заготовки

В схемах осадки волнообразной заготовки (рис. 1.31-в) основным дефектом является их неплоскостность горизонтальных полок, связанная со специ-

фикой процесса формообразования, из-за эффекта пружинения [109]. Существенным ограничением технологии производства профилей в штампах являются ограниченная длина получаемых деталей, низкая производительность.

Для преодоления указанных недостатков был разработан способ [109], включающий предварительное формообразование заготовки в роликах с последующей её осадкой в закрытом штампе, имеющем три сопряженных между собой участка – плющения, осадки и калибровки. На участке осадки полки рабочие поверхности инструментов, формирующие внешнюю сторону профиля, выполнены наклонными, а поверхности инструментов, формирующие внутреннюю сторону профиля – горизонтальными. Данный способ позволяет производить формовку профиля вперевдвжку (блок 2.2, рис. 1.22) с удержанием участков, прилегающих к очагу пластической деформации протяженности l , путем их обжатия в пределах упругости (рис. 1.32). На основе закона кратчайших нормалей была определена длина упругих участков $l_{упр}$:

$$l_{упр} = \frac{b \cdot s_s \cdot (4 \cdot s + b)}{8 \cdot s \cdot [\sigma_y]},$$

где b – ширина зоны плющения; s – толщина стенок профиля; $\sigma_s, [\sigma_y]$ – предел текучести и предел упругости материала заготовки соответственно.

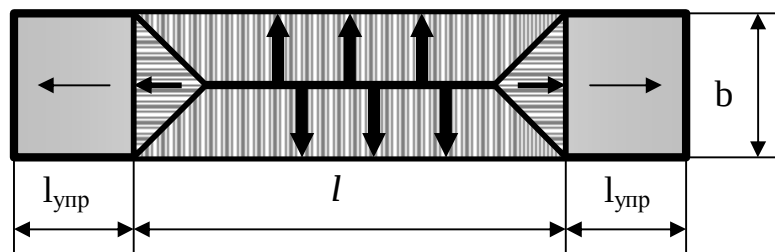


Рис. 1.32. Схема осадки полки с предотвращением продольного течения металла

Этим способом при толщине заготовки более 1,5 мм удастся получить длинномерные профили с радиусами зон сгиба меньше допустимых в отсутствие поводок, (практически идентичные прессованным по конфигурации зоны сгиба), что представляет собой его несомненное достоинство. Однако на профилях имеются следы зон перекрытия при общем высоком уровне остаточных напряжений. Профили толщиной 2 мм из сплава В95, изготовленные по этому способу и прошедшие испытания в ЦАГИ, были предназначены для ММЗ «Опыт» им А.Н. Туполева с целью постановки на самолет ТУ-204. Однако сложность реализации способа [3, 61] не позволила включить эту технологию в производственный цикл авиастроительного предприятия.

1.2.3. Изготовление гнутых профилей в инструментальных фильерах

Метод изготовления профилей в инструментальных фильерах с торцевым поджатием [110, 111] реализуется по схеме, изображенной на рис. 1.33. При волочении заготовки через фильеру происходит её последовательное свертывание с одновременным приложением тангенциальных усилий сжатия за счет избы-

точной ширины заготовки по отношению к размерам ручья фильеры [27]. Такая схема волочения позволяет получать зону сгиба с малым относительным радиусом и утолщением. При волочении через фильеру возможно растяжение периферийных элементов, особенно в случае стесненного изгиба (из-за избыточной ширины заготовки), что приводит к кромковой волнистости. В ряде случаев, например, при налипании материала может происходить разрыв полок или трещинообразование по кромкам. Одним из определяющих факторов процесса является оптимальная длина фильеры L_{opt} , которую рассчитывают по формуле [27, 112]:

$$L_{opt} = \frac{p \cdot b_0}{2 \cdot l_0},$$

где $b_0 = 0,5 \cdot (B_3 - l_0)$; l_0 – безразмерный параметр, определяемый из условия минимизации усилия волочения по данному параметру.

Здесь B_3 и l_0 – ширина развертки заготовки и ширина прямолинейной части фильеры соответственно. При этом безразмерный параметр l_0 должен удовлетворять условию:

$$l_0 \leq \sqrt{e_{дон} \cdot (2 + e_{дон})},$$

где $e_{дон}$ – допустимая деформация кромки профиля.

Сходные условия оптимальности процесса формулируются и для профилирования с тем отличием, что оптимальной длиной следует брать межклетье-

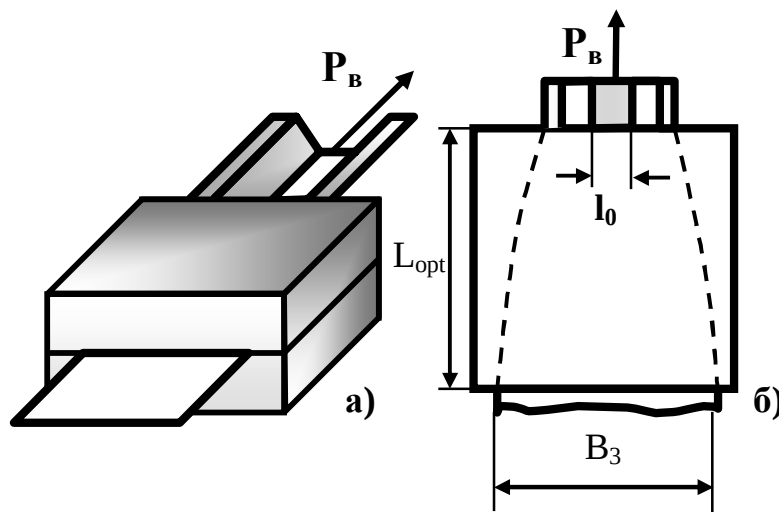


Рис.1.33. Волочение в инструментальной фильере: а) – общий вид; б) – геометрические параметры процесса

ное расстояние для профиля наибольших габаритных размеров из предполагаемой номенклатуры изделий, а вместо допустимой деформации, при которой происходит разрушение, следует брать деформацию кромки, вызывающую чрезмерный продольный прогиб или кромковую волнистость, не подлежащие исправлению в правильном устройстве.

Однако при протягивании заготовки возникают настолько большие силы трения, что заготовка, как указано выше, может испытывать разрыв. Это особенно характерно для профилей более сложной формы, чем швеллер. Уменьшить силы трения можно посредством приложения внешних воздействий, например, ультразвука [113], или же путем создания предварительной конфигурации заготовки с целью облегчения условий волочения. В работе [114] для изготовления профилей из трудно деформируемых материалов заготовки изгибают предварительно в штампе, а затем при протягивании оса-

живают их полки, имеющие несколько большую высоту, чем высота проточки в верхнем вкладыше фильеры.

Предпринимались попытки уменьшения сил трения в 5...6 раз при формообразовании профилей в фильерах путем замены инструментальных фильер на роликовые [115, 116]. В этих случаях ограничениями являлись следующие факторы: сложность подачи заготовки в фильеру, громоздкость технологического оборудования, его сравнительно низкая производительность. Использование в качестве волоки приводных роликов приравнивает данный процесс к разновидности профилирования.

Данный метод не получил широкого распространения из-за сложности изготовления фильер, больших усилий формообразования, низкой стойкости фильер, ограниченных технологических возможностей.

Модификацией рассмотренных способов изготовления профилей в фильерах является способ гибки проглаживанием по пуансону (рис. 1.34). Суть способа состоит в сжатии волнообразного участка заготовки в угловой зоне [117]. Этот способ идеально подходит для формообразования профилей из волокнистых композиционных материалов, не допускающих больших степеней деформаций изгиба вдоль волокон. Способ недостаточно разработан и в промышленности в настоящее время не применяется, однако ведутся работы по созданию опытно-промышленного образца соответствующего оборудования в Самарском аэрокосмическом университете.

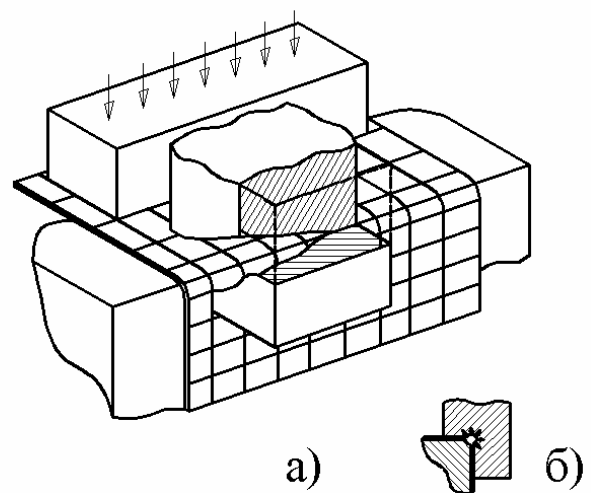


Рис.1.34. Гибка проглаживанием по пуансону: а-схема формообразования; б- угловая зона.

1.2.4. Изготовление гнутых профилей комбинированными методами

Комбинированные методы (рис. 1.22, блок 4) включают сочетание различных процессов обработки металлов давлением для производства гнутых профилей. К процессам, совмещающим предварительную гибку и **последующую штамповку** (рис. 1.22, блок 4.1), относится способ гибки с тангенциальным сжатием и осадкой полки [118, 119], в котором изогнутую предварительно заготовку 1 устанавливают в пазы вкладышей штампа 2, имеющих возможность перемещения между на-

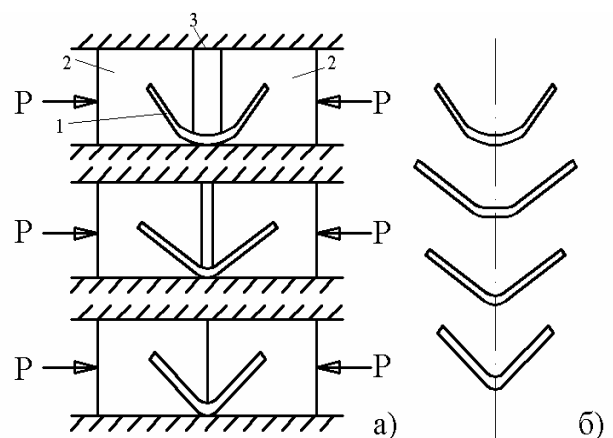


Рис. 1.35. Схема гибки с осадкой полки: а - последовательность процесса; б- схема формообразования.

правляющими плоскостями 3 до полного смыкания (рис. 1.35). Для каждого из этапов формообразования профиля в штампе работа [119] дает расчет кинематических и силовых параметров, анализ предельных возможностей. Показано, что при малой ширине заготовки происходит разрушение по выпуклой поверхности, а при большой – потеря устойчивости плоской средней зоны.

Способ позволяет получать утолщение в зоне сгиба (более чем на 30 % по сравнению с толщиной исходной заготовки) и близкий к нулевому радиус наружного контура зоны сгиба. Однако этот способ обладает и рядом недостатков: пригодность способа только для изготовления деталей небольшой длины, сложность съема детали, весьма ограниченные технологические возможности в отношении сортамента профилей. Реализация процесса также осуществима и в роликовом приспособлении типа задающей клетки с вертикальными валами профилегибочного станка ГПС-200.

К комбинированным методам может быть отнесена технология, описанная в работе [120] и предусматривающая изготовление волнообразной заготовки в роликах с последующей осадкой ее в закрытом штампе до получения

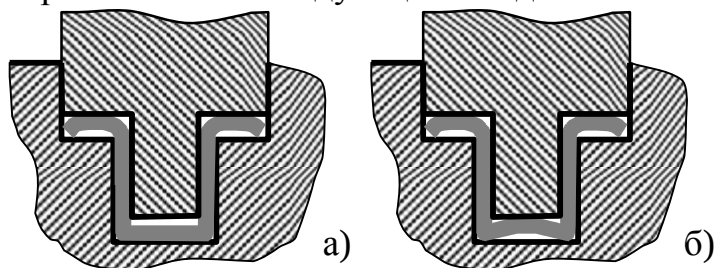


Рис. 1.36. Формовка заготовки-полуфабриката, полученного профилированием, в закрытом штампе: а – прямая схема; б – обратная схема

окончательной конфигурации детали (рис. 1.36). В этом случае технология, будучи сложной и ресурсоемкой, применима лишь для производства профилей с относительно узким дном и полками (предотвращение их остаточной кривизны).

Известен способ гибки проглаживанием (прокаткой) роликом (рис.1.37), позволяющий изготовление деталей с переменной площадью поперечного сечения и переменной шириной полок [121]. Заготовку 1 предварительно изгибают в штампе или в роликах, устанавливают на оправку 2, форма которой соответствует форме внутренней поверхности детали, и прижимают её к оправке боковыми щеками-накладками 3 (см. рис. 1.37). После этого цилиндрический валок (ролик) опускается на заготовку, прижимается к ней силой Р и под действием продольного усилия Q проглаживает заготовку, оформляя ее уголкового зоны. А.В. Инзарцевым получены зависимости, аппроксимированные для практического использования в виде [121]:

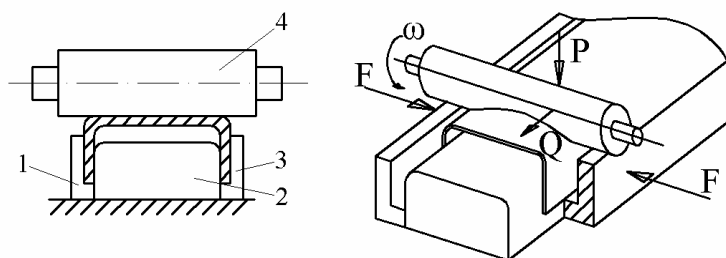


Рис.1.37. Гибка профиля проглаживанием роликом

После этого цилиндрический валок (ролик) опускается на заготовку, прижимается к ней силой Р и под действием продольного усилия Q проглаживает заготовку, оформляя ее уголкового зоны. А.В. Инзарцевым получены зависимости, аппроксимированные для практического использования в виде [121]:

$$Q = [3,54s_0 - 2,33R - 0,17R_0 - 5,44s_0^2 R_p^{-1} + 1,51 \cdot 10^{-2} \gamma s_0 +$$

$$+0,256RR_0s_0^{-1} - 3,3RR_p^{-1}s_0 + 7,25R_0s_0/R_p] \cdot s_0\sigma_\epsilon;$$

$$P = [1,75R - 3,1s_1 - 0,443R_0 + 5,21s_0\ln(R_p s_0^{-1}) +$$

$$3,13 \cdot 10^{-2} s_0\gamma - 2,71R\ln(R_p s_0^{-1}) + 0,975\ln(R_p s_0^{-1})] s_0\sigma_\epsilon;$$

$$F = 0,5Pctg\gamma/2,$$

где R_0 – радиус предварительного изгиба по выпуклой поверхности; R_p – радиус деформирующего вала; γ – угол между полкой и стенкой в градусах; s_0 – исходная толщина заготовки.

При прокате валком происходит тангенциальное сжатие материала, так что заготовка в угловых участках практически не растягивается в окружном направлении, а наличие сдвиговых деформаций смягчает схему деформирования, обеспечивая высокую точность деталей.

К недостаткам данного способа следует отнести сложность процесса, включающего две стадии деформирования, трудности позиционирования оправки и щек-накладок и, как следствие, обеспечения точности, ограниченные технологические возможности в отношении номенклатуры профилей, весьма ограниченное использование для производства профилей с покрытием.

Способ гибки образца со спутником (рис. 1.38) предусматривает предварительную завальцовку заготовки 1 в спутник 2 и последующую гибку с нагревом в штампе или роликах [3]. Деформирование образца из композиционного материала ВКА – 2, завальцованного в спутник, осуществляли в штампе и в роликовой паре между нижним 3 и верхним 4 роликами. Данный способ показал неплохие результаты, однако остался на уровне экспериментальных исследований из-за трудоемкости и высокой стоимости его реализации, хотя за рубежом существуют технологии, предусматривающие клеевое соединение образца из дорогостоящего композита и алюминиевого спутника для прокатки с их последующим разъединением.

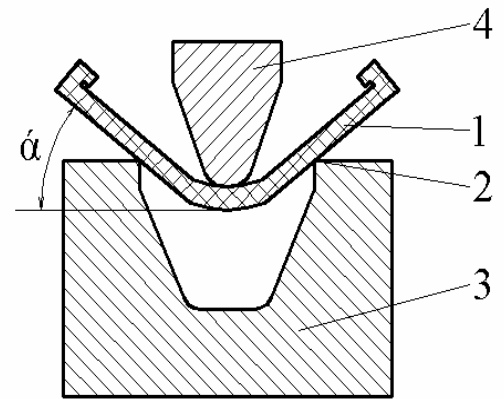


Рис.1.38. Деформирование образца со спутником

Известна технология производства длинномерных (до 14 метров) профи-

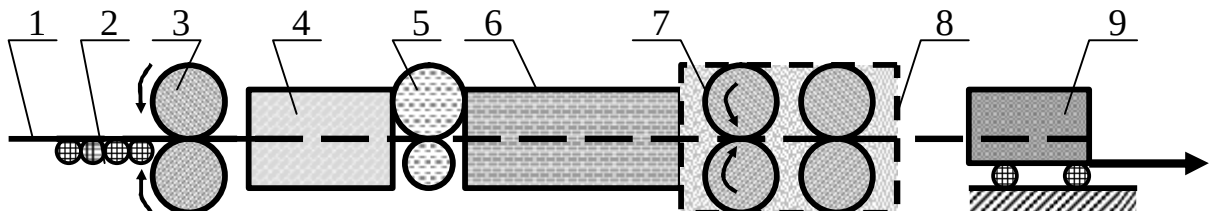


Рис. 1.39. Схема прокатно-волочильной установки: 1 – заготовка; 2 – рольганг; 3 – подающее устройство; 4 – электропечь скоростного нагрева; 5 – смазывающее устройство; 6 – электропечь стабилизирующего нагрева; 7 – гибочно-прокатный станок СГП-170; 8 – навесная печь нагрева роликов; 9 – тянущая каретка волочильного стана

лей повышенной жесткости [19, 20] из дисперсно-упрочненного композита

АБМ-1 [122, 123], в которой профилирование в роликах стесненным изгибом с нагревом до 600°C совмещалось *с волочением заготовки* (рис. 1.22, блок 4.2) с помощью цепного привода ЦС-28 при скорости 6 м/мин (рис. 1.39). Технология была создана в интересах космической отрасли и является дорогостоящим процессом, экономически не оправданным в приложении к нуждам таких отраслей, как строительство, автомобилестроение и т.д.

С целью повышения пластичности и обеспечения высокого качества профилей из труднодеформируемых материалов, в частности, из композиционного материала ВКА-2, была разработана установка для деформирования заготовки в роликовой паре *с локальным нагревом* (см. рис. 1.22), приведенная на рис. 1.40. В установке [124] нагрев заготовки достигается в результате пропуска тока высокой плотности через пару формирующих заготовку 1 роликов: нижнего 2 и верхнего 3 (рис. 1.41). Рабочие валки клетки изолированы текстолито-

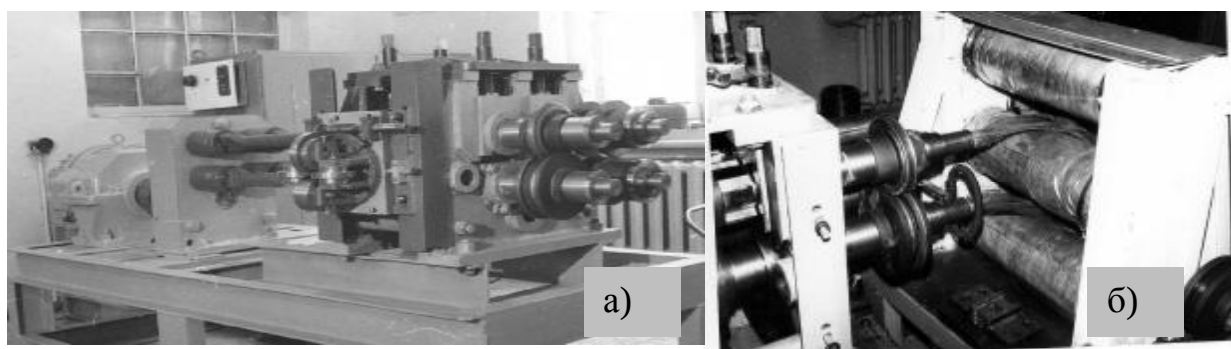


Рис. 1.40. Оборудование для формообразования профиля с локальным нагревом: а – станок; б – подвод тока от индуктора

выми втулками от станины. Верхний и нижний шпиндели 4, установленные на подшипники 5, изолированы от корпуса шестеренной клетки. Фланцы рабочей клетки изготовлены из изолирующего материала. Для установки и подключения петли 8 предусмотрены соединительные втулки 7, изготовленные из меди и закрепленные гайками 6. Для создания тока высокой плотности использован

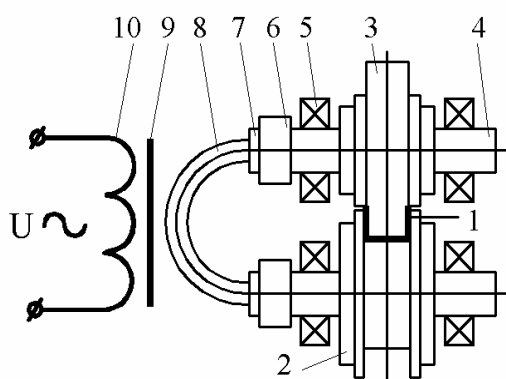


Рис. 1.41. Схема подвода тока от индуктора к заготовке

мощный понижающий трансформатор с первичной обмоткой 10, магнитопроводом 9 и вторичной обмотки в виде медной петли 8.

Несмотря на преимущества нагрева при формообразовании профилей из труднодеформируемых материалов, данный способ требует больших энергозатрат, специальных мер электробезопасности, оптимизации режимов нагрева и т.д., что ограничивает его промышленное применение.

Известен специальный способ, включающий объемное деформирование и локальный нагрев, который позволяет получать профили из труднодеформируемых материалов типа У9 при скорости профилирования от 3 до 15 м/мин на

стане СПК-300М [125]. Однако данный процесс следует скорее отнести к новизности технологии производства сортовых профилей.

1.2.5. Изготовление гнутых профилей в роликах

Формообразование профилей *в роликах* является наиболее универсальным методом производства профильной продукции, которое может быть условно разделено на традиционное профилирование (рис. 1.22, блок 5.1) и интенсивное формообразование (рис. 1.22, блок 5.2).

Традиционное профилирование (см. рис. 1.22, блок 5.1) ориентировано на использование многоклетевых профилегибочных машин с числом клетей от 10 до 52 [126], причем, катающие ролики имеют обычно диаметры более 300 мм [127]. Скорость профилирования заключается в диапазоне от 30 до 60 м/мин (хотя для крупносерийного производства применяются и станы с более высокой скоростью). Традиционное профилирование применяется, в основном, на предприятиях металлургического комплекса и предприятиях серийного производства (например, в отрасли автомобилестроения). Оборудование для традиционного профилирования является крупногабаритным: длина производственных линий профилирования достигает нескольких десятков метров. Это требует значительных производственных площадей, складских территорий для хранения технологической оснастки, что связано с высокими затратами на содержание производственных помещений. Освоение одного типа профиля достигает 500 тыс. руб. в ценах 2002. Кроме того, капитальные вложения на приобретение таких линий достаточно высоки: от 150 до 350 тыс. американских долларов за линию российского производства и от 300 тыс. долларов за линию зарубежного производства [128, 129]. Для сравнения, стоимость автоматизированных линий интенсивного формообразования отечественного производства составляет от 50 до 100 тыс. долларов, а освоение одного типа профиля не превышает 200 тыс. руб. в ценах 2002 года.

Отметим, что при традиционном профилировании проблема различных дефектов профилей решается простым увеличением числа задействованных клетей, в то время как при интенсивном формообразовании необходимо применять специальные технологические приемы для обеспечения качества получаемой продукции при небольшом количестве используемых переходов.

В последние годы наметилась устойчивая тенденция ко все большему использованию технологии интенсивного формообразования для изготовления длинномерных тонкостенных деталей постоянного поперечного сечения из различных материалов, преимущественно с покрытием, на парно-роликовых профилегибочных станках, что хорошо видно по заказам на технологию и оборудование для производства профильной продукции.

В сравнении с другими методами производства таких деталей (гибкой в штампах, прессованием, гибкой в машинах с поворотной траверсой, традиционным профилированием), технология интенсивного формообразования (стенный изгиб [39, 33, 3] и метод интенсивного деформирования [61], рис. 1.42) обладают рядом преимуществ [38]:

- возможность изготовления профилей минимальной толщины разнообразной номенклатуры;
- возможность замены сочетания нескольких стандартных профилей в конструкциях одним, имеющим сложную конфигурацию;
- возможность изготовления профилей из заготовок с покрытием;
- возможность производства профилей повышенной жесткости (с утолщением зоны сгиба до 20-30 % и минимальным радиусомгиба в 2-3 меньше допустимого радиусагиба, принятого для традиционных методов гибки; возможность деформирования высокопрочных и композиционных материалов, обладающих низкими пластическими свойствами;
- незначительные отходы металла (не превышающие обычно 1...2 %);
- высокое качество поверхности профиля, с шероховатостью, не превышающей, как правило, 0,63 мкм;
- высокая точность размеров профилей, не ниже точности 8 – 10 квалитетов;
- возможность использования компактного оборудования, имеющего низкое энергопотребление, малые габариты и невысокую стоимость;
- применение малого количества технологического оснащения, что позволяет сократить затраты на технологическую подготовку производства и уменьшить время и трудоемкость переналадок оборудования;
- сравнительно высокая производительность труда и адаптируемость процесса к масштабам производства;
- возможность совмещения профилирования с другими производственными процессами (правка, отрезка, гибка по контуру) - возможность механизации и автоматизации производства и др.

Хотя указанное выше разделение видов профилирования является в некоторой степени условным, однако оно позволяет более четко определять производственную ориентацию, научную и технологическую специфику соответствующих направлений. В табл. 1.5 приведены характерные отличительные черты каждого из этих методов

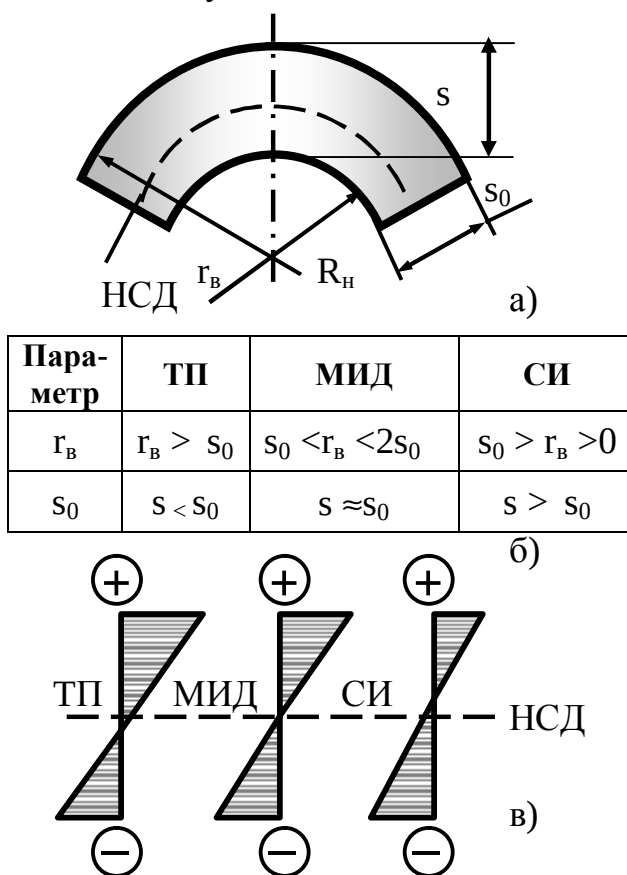


Рис. 1.42. Угловая зона и окружающие деформации при различных методах изготовления профиля в роликах: а – зона сгиба; б – характеристики методов; в – эпюры окружающих деформаций

формообразования профиля в роликах: традиционное профилирование (ТП), метод интенсивного деформирования (МИД) и стесненный изгиб (СИ).

Таблица 1.5

Характеристика методов формообразования профиля в роликах

Характерный показатель	Традиционное Профилирование	Метод Интенсивного Деформирования	Стесненный Изгиб
1. Толщина заготовки, мм	0,5...3,0	0,5...3,0	0,5...3,0
2. Скорость профилирования, м/мин	12...60 (до 180)	6...30	2...15
3. Углы подгибки за переход, град.	8..12	10...40	10...40*
4. Тип калибра	Открытый с высвобождением	Закрытый	Закрытый
5. Форма калибра	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Волнообразная
6. Диаметры роликов (по межосевому расстоянию)	D	$(0,4...0,7) \cdot D^{**}$	$(0,5...0,7) \cdot D$
7. Число переходов	N	$(0,5...0,7) \cdot N$	$(0,4...0,7) \cdot N$
8. Приложение дополнительных сил	—	Аксиальная, торцевая***	Торцевая, осадка заготовки
9. Правильное устройство	Не обязательно	Обязательно	Обязательно
9. Режим формовки радиусагиба	Плавный по переходам	На первых переходах	На последних переходах
10. Форма линии профилирования	Прямая	Кривая	Кривая
11. Технологические возможности: а) Н/С (отношение высоты профиля к ширине его дна) б) r_B/s_0	Любые $r_B/s_0 > (r_B/s_0)_{\text{доп.}}$	Любые $r_B/s_0 > 0,5$	$H/C \leq 2$ для прямой схемы; $H/C < 5$ для обратной схемы $r_B/s_0 > 0$
* – измеряется по наклону прямолинейного участка боковой стенки; ** – различие в значениях средних диаметров; *** – для специальных схем			

При использовании МИД нейтральный слой деформаций (НСД) практически совпадает со средней линией (СЛ), в то время как при традиционном профилировании нейтральный слой деформаций смещается к внутреннему контуру, а при стесненном изгибе – к наружному контуру зоны сгиба (см. рис. 1.42). Отсюда видно, что при стесненном изгибе и методе интенсивного дефор-

мирования происходит разгрузка наружного контура зоны сгиба, что позволяет достигать меньших радиусовгиба без разрушения заготовки.

При стесненном изгибе наряду с малым радиусом зон сгиба (меньшим допустимого для данного материала) возможно получение утолщения в уголко-вой зоне за счет придания заготовке волнообразной формы с последующей ее осадкой [33]. Возможны схемы с торцевым поджатием при плоской стенке, однако для набора утолщения в угловой зоне данная схема пригодна лишь для профилей с малой шириной полок (до $(20...30)S_0$) [33]. Увеличение ширины полки приводит либо к потери ее устойчивости (неплоскостности полки в поперечном направлении), либо к кромковой волнистости, что требует иных технологических решений.

1.3. Применяемые материалы для производства гнутых профилей

Класс используемых материалов для изготовления гнутых профилей в различных отраслях простирается от обычных рулонных (листовых) сталей до цветных металлов и сплавов с различными видами покрытий и композитов.

1.3.1. Материалы без покрытия

Применительно к профилированию наиболее непритязательны в технологическом отношении низкоуглеродистые стали, в которых влияние углерода определяется структурной формой, в которой он присутствует. Так, небольшие количества разрозненных зерен цементита и пластинчатого перлита не дают ухудшения пластических свойств, в то время как наличие сетки структурно-свободного цементита может резко снизить пластичность стали (по ГОСТ 9045-80 балл сетки не должен превышать двух – трех) [130]. Параметры твердости стали существенно зависят от содержания азота: чем больше азота, тем больше твердость. Деформируемость стали в первом приближении оценивается отношением предела текучести к пределу прочности (рекомендуемые значения для профилирования 0,55 – 0,60) [131] или величиной относительного удлинения [132]. Наиболее часто применяемые для производства гнутых профилей марки сталей: Ст2 – Ст6 (спокойные или кипящие), сталь 08кп, сталь 10 кп, сталь 08Ю, сталь 09Г2, для которых состав, механические характеристики, виды поставки и соответствующие ГОСТ указаны в работе [133]. Влияние химического состава, режимов механической и термической обработок на технологические свойства и прочностные параметры указанных материалов подробно рассмотрено в работах [134 – 136]. Отметим, что для приведенных марок сталей относительное удлинение превышает 20 %.

Высокопрочные алюминиевые деформируемые сплавы (В95, В93, 01420) и деформируемые магниевые сплавы (МА2-1, МА8) имеют относительное удлинение от 7 до 12 % [137], а деформируемые алюминиевые сплавы (АМцМ, АМг2М – АМг6М), не упрочняемые термической обработкой, – порядка 20 – 23 % [115].

У титановых сплавов (ОТ4, ВТ5) величина относительного удлинения располагается в диапазоне от 10 до 15 % [15].

Указанные выше группы материалов обладают к тому же существенной анизотропией свойств, которая влияет не только на характеристики пластичности, но и на силовые параметры процесса. Например, по сравнению с изотропным материалом относительное усилие прокатки анизотропных алюминиевых сплавов составляет величину 0,9, а для титановых сплавов эта величина достигает до 1,3 [138].

Изготовление длинномерных профилей с малыми радиусами зон сгиба из высокопрочных алюминиевых сплавов представляло несколько лет назад актуальную проблему в авиастроении, которая была решена путем использования метода стесненного изгиба [38].

1.3.2. Плакированные материалы и материалы с металлическим покрытием

В авиационной промышленности широко применяют плакированные алюминиевые сплавы для изготовления несущих элементов фюзеляжа летательного аппарата [25]. Чистый алюминий применяется для плакировки деформируемых авиационных сплавов, а сплав алюминия с 1 % цинка – для высокопрочных сплавов (например, В95) [139]. При использовании стесненного изгиба для производства профилей с отбортовками малой высоты возникает проблема нарушения плакирующего покрытия вблизи торцов. Наблюдаются также дефекты, вызванные значительными контактными напряжениями, а также сжимающими напряжениями на внутреннем контуре зоны сгиба. При прочих равных условиях указанные дефекты связаны с различием механических свойств основного материала и плакирующего слоя.

В качестве металлического покрытия стальной ленты в России и за рубежом чаще всего применяют цинк для защиты металла от коррозии [140 – 142]. Нанесение металлического покрытия на цинковой основе определенной толщины (табл. 1.6) получают горячим или электролитическим способом [143-145].

Таблица 1.6

Характеристика толщины цинковых покрытий

Вид нанесения покрытия	Толщина, мкм	
	В России	За рубежом
Горячее цинкование	10-60	2-25
Электролитическое цинкование	2-12	2-10

Оцинкованная сталь, полученная из расплава горячим способом, обладает лучшими защитными свойствами, а покрытие имеет большую адгезию и прочность по сравнению с электролитической сталью, поэтому около 70% оцинкованных поверхностей цинкуют из расплавов [143].

Оцинкованные стали имеют лучшую деформационную способность по сравнению со сталями без покрытия, что связано с уменьшением трения между материалом и инструментом. Это объясняется тем, что слой покрытия сам под-

вергается пластической деформации и удерживает смазку [144]. Поведение цинковых покрытий в различных процессах обработки металлов давлением (при штамповке и в условиях сложного нагружения) рассмотрено в ряде зарубежных работ [146 – 150], где отмечается нарушение покрытия в основном при больших контактных напряжениях, а также при изгибе заготовки на радиус, близкий к нулевому.

При интенсивном формообразовании гнутых профилей в роликах нарушение поверхности оцинкованной заготовки наблюдается при больших контактных напряжениях, а налипание/перенос покрытия на формирующие ролики – лишь в случае неудовлетворительного качества покрытия исходной заготовки (из практики автора: такие случаи практически не имели места при работе с лентой Новолипецкого металлургического комбината – НМЛК). При условиях, предвещающих потерю устойчивости элементов профиля, на них появляются линии Чернова-Людерса, ухудшающие потребительские качества последнего.

1.3.3. Материалы с органическим покрытием

Для защиты металлов от коррозии [151] в последние годы все чаще применяются органические покрытия, при этом выбор покрытия должен удовлетворять следующим требованиям: малая продолжительность формирования и сушки покрытия, высокие физико-механические и декоративные свойства, достаточная коррозионная стойкость [151], кроме того, покрытие должно быть устойчиво к дальнейшей переработке материала [150 – 152]. Указанным требованиям удовлетворяют покрытия, наносимые на рулонный материал, которые можно разделить на термореактивные и термопластичные покрытия, получаемые из жидкой фазы, и полимерные пленки [153]. В настоящее время практически все лакокрасочные материалы, используемые для окраски листового и рулонного материала, производят на основе синтетических олигомеров и полимеров [154], в связи с чем в дальнейшем речь будет идти о полимерных покрытиях, подразделяемых на три группы: 1 – термореактивные покрытия (акриловые, полиэфирные (ПЭ), эпоксидные (ЭП)); 2 – термопластичные покрытия (поливинилхлоридные пластизоли (ПЛ) и органополи, а также сополимеры винилхлорида); 3 – пленки (на основе поливинилхлорида (ПВХ), полиэфиров, полипропилена).

Из множества характеристик полимерных материалов наибольший интерес представляют характеристики конечного полуфабриката (табл. 1.7) – листа или ленты [154–156].

С точки зрения профилирования наиболее важным из физико-механических свойств покрытия является его эластичность, позволяющая осуществлять изгиб заготовки [154]. Другие свойства, приведенные в табл. 1.7, можно отнести к служебным или потребительским свойствам.

Термореактивные покрытия имеют высокие декоративные свойства (разнообразие цвета и блеска) и сохраняют свои исходные свойства при различных температурах. Их недостатком является низкая коррозионная стойкость и низкая эластичность покрытия, что ограничивает развитие значительных деформаций при переработке материала-полуфабриката. Из термореактивных покрытий

следует выделить полиуретановые (ПУ) покрытия [157], обладающие высокой эластичностью и коррозионной стойкостью: даже если при изгибе такого покрытия на 180° в покрытии образуются микротрещины без отслаивания, его принимают годным к использованию.

Таблица 1.7

Основные свойства покрытий, применяемых на рулонном материале

Вид покрытия	Свойства покрытий			
	Физико-механические (эластичность и прочность)	Декоративные (выбор цвета, блеска, рисунка)	Антикоррозионные (коррозионная стойкость)	Атмосферостойкость (отсутствие изменения цвета, температурные ограничения)
Термореактивные	Низкие	Высокие	Низкие	Высокая
Термопластичные	Высокие	Низкие	Высокие	Низкая
Пленки	Высокие	Высокие	Высокие	Высокие

Термопластичные покрытия обладают высокой эластичностью и коррозионной стойкостью, однако они не отличаются разнообразием цвета и блеска, и к тому же имеют низкую стойкость цвета к низким и высоким температурам.

Практически всех указанных выше недостатков лишены ПВХ пленки, наклеиваемые на металл и обладающие высокими физико-механическими, декоративными и антикоррозионными свойствами. Покрытие на основе ПВХ-пластизолой толщиной 200 мкм является наиболее долговечной при защите рулонного материала и способно выдерживать деформации до 60 % [152], однако цена такого материала существенно превышает цену материала с покрытиями, получаемыми из жидкой фазы.

Из отечественных материалов с покрытием более высокими показателями, существенными для последующего формообразования, обладает продукция НЛМК, доля которой на российской рынке превышает 65 % [64].

За последние годы разработаны комбинированные покрытия (рис. 1.43) не только для сталей, но и для алюминиевых сплавов [158, 159]. Применение полимерного покрытия совместно с цинковым (так называемый "дуплекс") [156, 160] позволяет увеличить срок службы такого материала по сравнению с материалами, использующими два вида указанных покрытий по отдельности (табл. 1.8). Наличие цинкового подслоя дуплекс-покрытия защищает торцы ленты после резки [59].

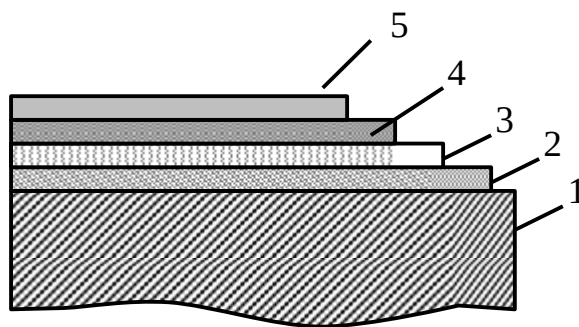


Рис.1.43. Структура листового материала с комбинированным покрытием: 1)- подложка; 2) – металлическое покрытие; 3) – грунт; 4) – краска (эмаль); 5) – лак

Однако следует иметь в виду, что адгезия между холоднокатаным листом и полимерным покрытием выше, чем между последним и оцинкованным листом.

Таблица 1.8

**Свойства стальной электролитически оцинкованной полосы
с термореактивным ЛКП**

Лакокрасочное покрытие	Физико-механические показатели				Коррозионная стойкость
	R_p , Н*М	E , м*10 ³	A , балл	$R_{и}(r_B)$, (по «Г»)	$C, ч / S, \%$
Эпоксидный грунт, акриловая эмаль	5,0	8,0	1	2	240 / 24
Грунт ЭП-0200, акриловая силик. эмаль	5,0	8,0	1	2	360 / 2
Грунт ЭП-0200, эмаль МЛ-12	4,5	7,5	1	2	240 / 15
Акриловый грунт, печатная краска, акриловый лак	5,0	7,5	1	2	240 / 10
Эпоксидный грунт, ПВДФ - эмаль	5,0	8,0	1	2	720 / 1
Грунт АК-0138, органич. ОД-ХВ-221	5,0	8,0	2	1	240 / 2
Примечание: R_p - прочность покрытия к прямому удару по У-1А (ГОСТ 4765-73); E - эластичность на приборе МЛТ-10Г (ОСТ 6-10-411-77); A - адгезия по методу решетчатого надреза (ГОСТ 15140-78); $R_{и}$ - прочность покрытия при изгибе; C - солестойкость; S - площадь коррозии					

Из сводного анализа сочетаемости подложек, материалов покрытий и характеристик толщины слоев материалов с комбинированным покрытием (табл. 1.9) видно, что далеко не все комбинации являются приемлемыми.

Таблица 1.9

Сочетаемость материалов и характеристики толщины покрытий

Слой / вид покрытия	Стальная подложка				Al подложка	Толщина, мкм
	ПЭ	ПУ	ПЛ	Пленка		
Защитная пленка	+/-	-	-	-	+/-	100
Полимерное	+	+	+	+	+	25 – 250
Грунт	+	+	+/-	+	+	5 – 10
Антикоррозионное	+	+	+	+	-	1
Защитное металлическое	Zn	Zn	Zn/-	Zn/-	-	2 – 60
Подложка	Fe	Fe	Fe	Fe	Al	400 – 800
Защитное металлическое	Zn	Zn	Zn/-	Zn/-	-	2 – 60
Антикоррозионное	+	+	+	+	-	1
Грунт	+	+	+	+	+	5 – 10
Полимерное	+/-	-	-	-	-	25 – 35
* – в качестве грунта применяется клеевой слой						
Обозначения: + – хорошая сочетаемость; +/- – средняя; - – плохая сочетаемость						

Покрyтия yлучшают деформационную способность металла, в частности, за счет снижения трения заготовки о поверхность инструмента, что дает возможность достижения больших степеней деформации.

Для оценки технологичности изготовления того или иного профиля характеристики покpытия должны в обязательном порядке приниматься во внимание.

1.3.4. Композиты на металлической основе

Композиционные материалы на металлической основе находят широкое применение в аэрокосмической промышленности. Известно применение композита с алюминиевой матрицей и стальными армирующими волокнами (типа отечественного материала КАС) при производстве топливных баков для ракет, что позволило снизить их массу на 14 % [15]. Ведутся работы по применению армированных материалов в планерах самолетов, вертолетов, баллистических ракет и космических аппаратов [19, 20].

Некоторые классы композитов на металлической основе (рис. 1.44) могут использоваться для производства гнутых профилей с применением методов интенсивного формообразования, в том числе в роликах профилегибочных станков [20].

Для *армированных волокнами композитов* характерно квазиравномерное распределение волокон по объему. При этом внешняя нагрузка P распределяется между волокнами и матрицей так, что имеет место соотношение:

$$P = P_M + P_B, \quad \varepsilon = \varepsilon_M = \varepsilon_B,$$

где P_M , P_B – нагрузка на матрицу и волокна соответственно, ε , ε_M , ε_B – суммарная деформация композита, деформации матрицы и волокна соответственно.

Прочность волокнистого композита зависит линейно от объемного содержания волокон, а распределение нагрузки между волокнами и матрицей – от соотношения их объемных частей и модулей упругости [137].

Для армирования используют тонкую проволоку из стали [22, 23], стекловолокно, волокна из углерода, бора и других материалов. Матрица может быть из алюминия, магния, титана.

Неорганические армирующие компоненты весьма чувствительны к изгибу при профилировании, поэтому схемы формообразования должны быть достаточно «мягкими».

Дисперсно-упрочненные композиты и материалы, упрочненные частицами, имеют металлическую матрицу (например, алюминиевую) с распределенными по ней частицами (например, бериллиевыми или углеродными). Частицы препятствуют движению дислокаций, повышая тем самым прочность материала. При формообразовании в роликах эти материалы ведут себя почти так же, как и традиционные листовые материалы, однако при малых радиусахгиба

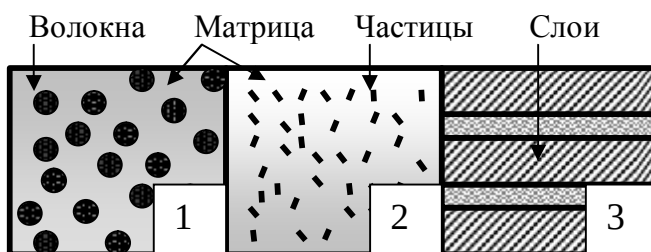


Рис. 1.44. Структуры композиционных материалов: 1- волокнистых; 2 – дисперсно-упрочненных; 3 - слоистых

характер их разрушения существенно отличается от обычных материалов: сказывается влияние частиц [19].

Слоистые композиты, состоящие из слоев металла и слоев связующего вещества между ними, весьма чувствительны к сдвиговым деформациям и сильно подвержены расслоению при прокатке в роликах. Расслоения также имеют место даже при гибке в кромкогибочных устройствах [17].

1.4. Дефекты профилей, возникающие при формообразовании, и требования к готовым гнутым профилям

При отработке технологии изготовления гнутых профилей в роликах могут возникать дефекты заготовки/профиля [61] (рис. 1.45).

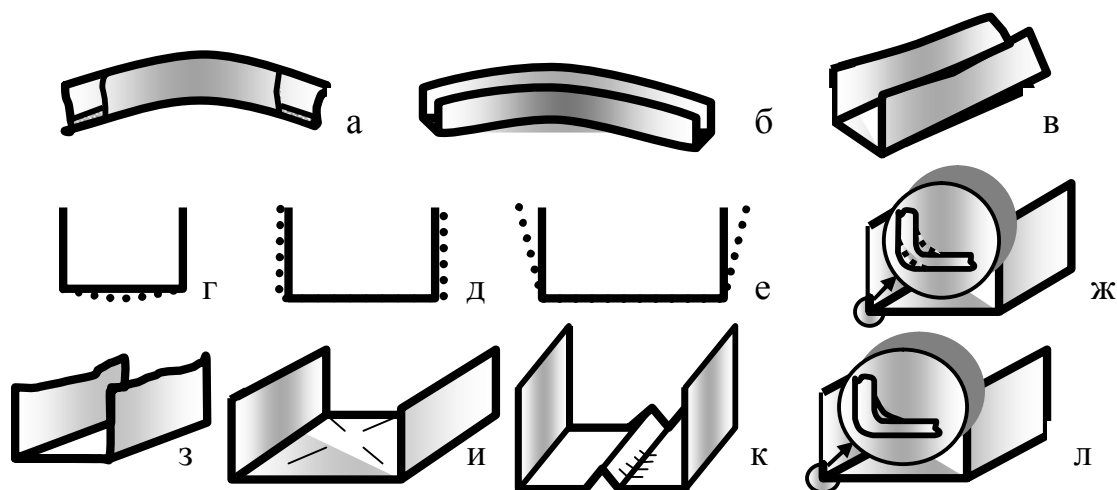


Рис. 1.45. Дефекты гнутых профилей: а) – продольная кривизна; б) – сабле-видность; в) – скрутка; г) – недоформовка по высоте; д) – отклонение размера по ширине; е) – пружинение; ж) – отклонение по радиусу; з) – кромковая волнистость; и) – хлопок; к) – мелкие гофры; л) – отслоение покрытия

Указанные на рис. 1.45 дефекты характерны как для традиционного профилирования, так и для методов интенсивного формообразования профилей. Анализ возникновения дефектов формы (рис. 1.45, а – е), а также дефектов сечения профиля и нарушения покрытия (рис. 1.45, ж, л) обсуждаются в разделе анализа схем формообразования 1.5. При использовании методов интенсивного формообразования профилей дефекты проявляются резче, чем при традиционном профилировании, что требует более основательного изучения закономерностей процессов формоизменения и введения ряда технологических мер по стабилизации процесса и повышению уровня выхода годной продукции.

Перечень дефектов, связанных с потерей устойчивости при традиционном профилировании (рис. 1.45, з – к), оказывается более широким для методов интенсивного формообразования (рис. 1.46) [3].

2.4.1. Кромковая волнистость

Кромковая волнистость полок (рис. 1.46-1) образуется вследствие неравномерности распределения продольных деформаций по сечению профиля. Она может возникать как в межклетьевом пространстве, так и по выходу профиля

из правильного устройства или блока формирования продольной кривизны профиля [161, 162] при жестких режимах формовки ($\Delta\alpha \geq 15 - 30^\circ$) тонкостенных элементов ($b/s \geq 20$) [163]. Допустимая амплитуда кромковой волнистости по ГОСТ 8282-83, ГОСТ 8278-83, ГОСТ 8283-93 составляет $\omega_M = 2$ мм. Для Z – образных профилей (ГОСТ 13229-78) и неравнополочных швеллеров (ГОСТ 8281-80) накладываются дополнительные требования минимальной длины волны $T = 500$ мм. Еще более жесткие ограничения на значение амплитуды волны накладывает DIN 59413: – 0,3 мм при шаге волны не менее $T = 500$ мм [3].

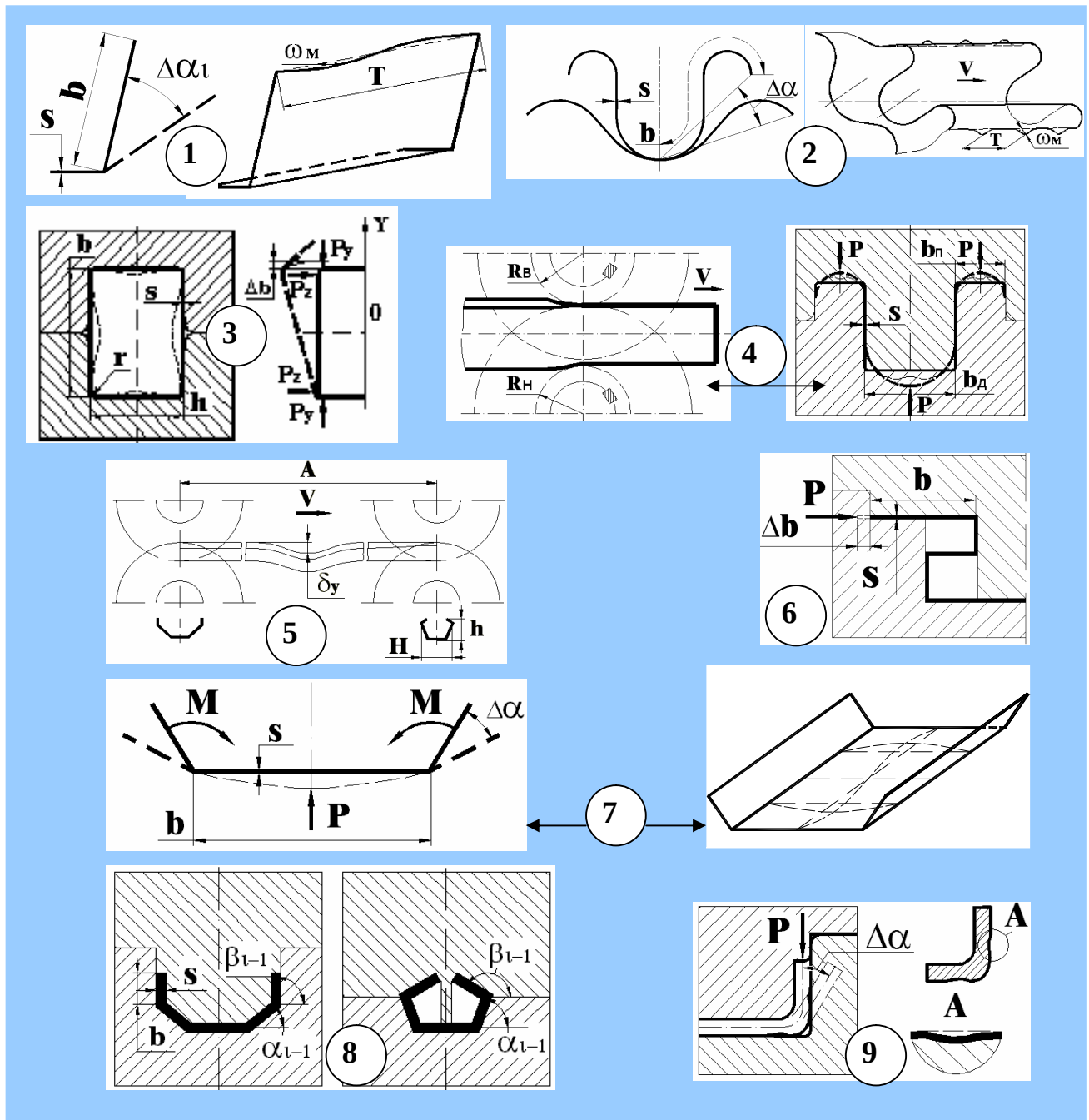


Рис. 1.46. Дефекты профилей при интенсивном формообразовании: 1) – кромковая волнистость; 2) – излом полок; 3) – выпучивание стенок; 4) – потеря устойчивости при осадке криволинейных участков; 5) – общая потеря устойчивости заготовки в межклетьевом пространстве; 6) – потеря устойчивости краевых элементов профиля; 7) – хлопуны; 8) – неустойчивость захвата кромок роликами (смятие); 9) – вмятины вблизи угловой зоны вследствие осадки

1.4.2. Излом полок

Периодические изломы криволинейных или многоэлементных полок (рис. 1.46-2) возникают по причине ошибочной схемы формообразования [164] или из-за отклонений настройки калибров последующих клетей в пределах $\Delta Y = 1 - 2$ мм, при $b/s \geq 20$ с углами подгибки за переход $\Delta \alpha \geq 25 - 40^\circ$ [3]. Излом полки приводит к концентраторам напряжений на кромках, нарушению покрытия заготовки, а в ряде случаев – к выходу заготовки из калибров роликовых пар и попаданию краев заготовки в посадочные элементы валков, что может стать причиной поломки роликового инструмента. Наиболее подвержены этому дефекту профили с отбортовками при $b/s \geq 30 - 50$, причем, глубина проникновения излома может достигать угловой зоны, примыкающей к базовому элементу (дну) профиля [165, 166].

1.4.3. Выпучивание стенок

Чаще всего выпучивание стенок профилей коробчатого сечения (рис. 1.46-3) происходит из-за превышения величин «стеснения» заготовки при ее движении от клетки к клетке [164]. В первых клетях профиль формируется с доступом вала к месту изгиба, а в последних клетях профиль формируется без фиксации внутренней зоны сгиба. При попытке отформовать местагиба с малыми радиусами за счет сжатия боковых стенок профиля на величину $0,3 - 0,5$ мм последние теряют устойчивость и выпучиваются вовнутрь профиля [3].

1.4.4. Потеря устойчивости при осадке криволинейных участков

Направленная потеря устойчивости будущих горизонтальных полок и дна профиля при стесненном изгибе (рис. 1.46-4) может сопровождаться обратным остаточным прогибом при избыточной ширине заготовки, особенно в случае широких полок или дна профиля [33]. При наличии широких горизонтальных элементов, в частности, дна профиля ($b_d/s \geq 20$) возможно применение обратной схемы формообразования (создание волнообразного участка) на предварительных переходах [167]. Предположение о том, что остаточный прогиб горизонтальных полок связан с потерей устойчивости типа «хлопка» [3] является неосновательным, поскольку деформирование заготовки происходит в сугубо пластической области. Остаточный прогиб связан исключительно со спецификой схемы формообразования и выбранной шириной заготовки.

По ГОСТ 8282 – 83 вогнутость и выпуклость элементов профиля не должна превышать 1,5% ширины стенки; по ГОСТ 30245-94 – 1% размеров поперечного сечения; по ГОСТ 25577–83 – не превышать 1 мм; по DIN 59413 – не выводить линейные размеры поперечного сечения за пределы допуска $\pm 0,3$ мм [3].

1.4.5. Общая потеря устойчивости заготовки в межклетьевом пространстве

Данный вид потери устойчивости (рис. 1.46-5) имеет место при больших отношениях межклетьевого расстояния к размерам поперечного сечения профиля (порядка 30 – 40). Он обусловлен значительным прогибом δ_y профиля с

малым моментом инерции поперечного сечения относительно горизонтальной оси, для концов которого можно принять условия шарнирного закрепления на уровне осевых плоскостей роликовых пар. Этот вид потери устойчивости проявляется в виде излома краевых подгибаемых элементов и «складывания» заготовки. Способы предотвращения дефекта – применение межклетьевых проводок или станков с малым межклетьевым расстоянием. Среди других способов – смягчение режимов подгибки или обеспечение значительного переднего натяга [168].

1.4.6. Потеря устойчивости краевых элементов профиля

Краевые элементы профиля (рис. 1.46-6) теряют устойчивость при приложении торцевых сжимающих усилий к горизонтальной полке для формовки места изгиба с малыми внутренними радиусами $r < 2s$ [169] или в совмещенных процессах формообразования и гибки профиля по контуру [162].

1.4.7. Хлопуны

Хлопуны (рис. 1.46-7) могут возникать на донной части и стенках профиля. В донной части профиля хлопуны возникают при толщине заготовки до 0,7 мм вследствие превышения предельных углов подгибки при режиме формовки с жесткой угловой зоной (радиусгиба соизмерим с толщиной заготовки). На стенках хлопуны могут возникать при формообразовании профилей с жесткими краевыми элементами (отбортовками, элементами двойной толщины, петельными элементами). В редких случаях причиной появления хлопунов является нерегулярный зазор в роликах вследствие биения валов (в пределах 0,05...0,15 от толщины заготовки). При этом происходит раскатка средней части элемента, подвергающейся последующему локальному выпучиванию. В других случаях причиной возникновения хлопунов служат некомпенсированные в пластической области сжимающие напряжения [61].

1.4.8. Неустойчивость захвата кромок роликами

При формообразовании многоэлементных профилей и профилей полузакрытого типа с узкими полками возникает проблема подгибки последних и их задания в роликовый калибр (рис. 1.46-8). Неустойчивость процесса связана с большими контактными силами и жесткостью прилегающей угловой зоны. Данное явление весьма опасно, поскольку возможен захват кромки торцевыми поверхностями буртов роликов, приводящий к разрыву заготовки и явлению задира посадочных поверхностей буртов [3]. В ряде случаев эта проблема решается применением межклетьевых проводок, что позволяет производить одновременную формовку всех элементов профиля [170].

1.4.9. Вмятины вблизи угловой зоны

Вмятины вблизи угловой зоны (рис. 1.46-9) возникают вследствие неравномерного распределения контактных напряжений между заготовкой и коническими участками роликов (фактически возникает как бы локальная раскатка) [3]. Однако такой же эффект имеет место и при осадке короткой полки при высвобождении внутреннего контура заготовки. В этом случае механизм образо-

вания вмятины совершенно иной и он связан с наличием сдвиговых деформаций и касательных напряжений в угловой зоне [171].

Рассмотрение дефектов заготовок и профилей, возникающих при формообразовании последних, показывает, что требуется более глубокий анализ и выявление причин появления дефектов с целью более качественной разработки технологии интенсивного формообразования. К этому стимулируют и требования к качеству конечного профильного продукта, сформулированные в нормативных документах различных отраслей народного хозяйства.

1.4.10. Сводные требования к качеству гнутых профилей и деталей

Требования к качеству гнутых профилей, будучи существенно зависимыми от области применения последних, несут некоторый оттенок отраслевой принадлежности. Условия сборки, эксплуатации и ремонта конструкций накладывают определенные условия на качество профильной продукции и обычно отражаются в регламентирующей конструкторской и технологической документации в виде общих или специфических требований. Например, в авиастроении приняты требования, сведенные в табл. 1.10 [172, 173].

Таблица 1.10

Требования к гнутым профилям в авиастроении

Контролируемый параметр	Требование	Примечание
Прогиб	Не более 1,5 мм/м; суммарный < 4 мм	Под грузом 50 Н
Скрутка	Не более 1 град/м	Суммарная < 15 °
Микронеровности в зоне сгиба	Не более 30 мкм	По высоте
Допуск на радиус	По ОСТ 100022-80	–
Отклонения размеров сечения от ШКС	Не более 0,2 мм	Кроме толщины
Допуск на толщину	Как в исходном листе (1/2 минусового допуска)	РТМ1.4.1630-86
Допуск на угловые размеры	± 30′	–
Остаточная деформация	Не более 20%	–
Механические свойства	По ОСТ 190125-83	–

В машиностроении применяют требования, сведенные в табл. 1.11 [61].

Таблица 1.11

Требования к гнутым профилям в машиностроении

Параметры	Размеры	Допуск
Габариты сечения	До 50 мм 50 – 100 мм 101 – 200 мм более 200 мм	± 1,0 мм ± 1,5 мм ± 2,0 мм ± 3,0 мм
Толщина	1,0 мм 1,5 мм 2,0 мм	± 0,11 мм ± 0,14 мм + 0,17/-0,21 мм
Волнистость кромки	Любой	До 2 мм
Продольный прогиб	Любой	До 1 мм/м
Скрутка	Любой	До 1 град/м

Следует отметить, что приведенные требования не являются исчерпывающими. Заказчики профильной продукции обычно резюмируют свои требования к качеству профилей в технических условиях на их поставку, где отражаются и специфические требования, такие как допуск на радиусы зон сгиба в авиастроении или линейные размеры и качество поверхности в строительной индустрии: «На поверхности цинкового или лакокрасочного покрытия профилей допускаются потертости, риски, следы формообразующих валков, не нарушающие сплошности покрытия» [66]. Требования к гнутым профилям, применяемым в строительстве, изложены в работах [66 – 78].

1.5. Профилегибочное и вспомогательное оборудование

Профилегибочное (формообразующее) и вспомогательное оборудование (табл. 1.12) для производства гнутых профилей достаточно разнообразно.

Таблица 1.12

Оборудование для производства гнутых профилей и деталей из них

№	Наименование	Назначение
Формообразующее оборудование		
1.	Профилегибочные станки	Формообразование сечения профиля
2.	Направляющие и подающие устройства	Задание заготовки в первую клетку профилегибочного станка
3.	Устройства формирования продольной кривизны	Придание профилю продольной кривизны
4.	Проводящие устройства	Задание заготовки в клетки станка, предотвращение дефектов формы профиля
Раскройное оборудование		
1.	Дисковые ножницы	Роспуск рулонов, подрезка ленты
2.	Подъемные краны, тележки	Транспортировка рулонов, ленточных бобин
3.	Рулонницы разматывающие	Размотка рулона, ленты
4.	Рулонницы наматывающие	Прием ленты, отходы в виде кромок
5.	Ножницы и прессы для поперечной резки и обесечки	Поперечная резка ленты, обесечка углов ленты или полосы
Правильное оборудование		
1.	Правильные машины	Правка ленты, устранение полос
2.	Правильные устройства	Правка профиля при формообразовании или правка после него растяжением
Перфорирующее и отрезное оборудование		
1.	Прессы	Перфорация и разделение профиля на мерные длины
2.	Специализированные устройства перфорации ленты и резки профиля	Перфорация ленты и резка профиля в движении
Дополнительное оборудование		
1.	Приемные столы, склизы	Прием готового профиля
2.	Штабелеры	Прием и укладка готового профиля

В табл. 1.12 не указано технологическое оснащение для каждого из видов оборудования, которое в некоторой степени специфично для процессов интенсивного формообразования профилей. Рассмотрим более подробно лишь фор-

мообразующее оборудование для профилирования ленты, производимое зарубежными и отечественными компаниями, как наиболее важное.

Используемое профилегибочное оборудование, если только оно не разработано специально под определенную технологию, непосредственно влияет на выбор технологии и конечный результат предприятия.

1.5.1. Профилегибочное оборудование зарубежных фирм

Хотя к настоящему времени за рубежом существует разнообразное гибочное оборудование для производства профилей (например, автоматы типа Muticenter немецкой фирмы Buhler [174] или универсально-гибочные машины фирмы Schroder [86]), однако они являются малопроизводительными, не обеспечивают высокой точности и характеризуются ограничениями по производству деталей сложных форм сечения и длиной более 3000 мм.

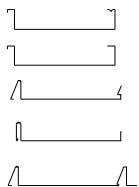
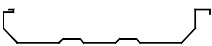
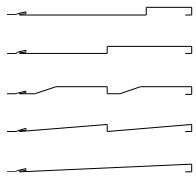
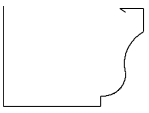
Указанных недостатков лишены парно-роликовые профилегибочные машины (станки), выпускаемые различными зарубежными компаниями.

Широко известны автоматизированные линии профилирования фирмы «ИММ» (США), комплектуемые в зависимости от требований одной из четырех моделей профилегибочных машин, имеющих от 11 до 18 рабочих клеток. Линии предназначены для профилирования рулонного металла в диапазоне толщин от 0,8 до 6,0 мм при скоростях от 15 до 50 м/мин. Не менее известна фирма «Knudson Manufacturing» (США), специализирующаяся на изготовлении профилей для строительной индустрии, своими малогабаритными станками (табл. 1.13). Особенностью данного вида оборудования является его транспортабельность на прицепах к месту строительства и возможность функционирования в полевых условиях [3]. Фирма Rollsec Ltd (США) разработала 18-клетьевую профилегибочную машину, клеть которой содержит 4 комплекта инструмента. Машина встраивается в линию, включающую также тележку, разматыватель, летучие ножницы, конвейер [126].

Западногерманская фирма «Dreistern» производит 18 видов профилегибочного оборудования с числом клеток от семи до девяти, в которых можно осуществлять прокатку ленты толщиной от 0,5 до 8 мм [175]. Особенности станков: все валы приводные; клеть включает замыкающие серьги и снабжена маслоподающей системой. Регулировка положения роликов осуществляется маховиками (два – для горизонтального смещения роликов, один – для подъема – опускания верхнего вала). Примерно такие же характеристики имеют профилегибочные машины фирм «Даниэл Смит» (Великобритания), «Вост-Альпине» (Австрия) [176], «Ван-Оттерлоо» (Нидерланды) [177]. Установка «Фагот» испанской фирмы «Аппасате» [178] содержит 12 формующих клеток и позволяет изменять скорость профилирования в диапазоне от 0 до 100 м/мин.

Компания «Dynaform» (Сингапур) производит профилегибочные машины 13 моделей под определенные диапазоны толщин профилируемого металла (табл. 1.14). Станки фирмы «Dynaform» оснащены электронными регуляторами скорости профилирования и электроникой с программированием последовательности выполнения операций отрезки и перфорации в составе автоматизированной линии.

Технические характеристики станков “Knudson”

Модель	KR-21 VP	KR-18B	KR-84N	KR-56A	KS-246A	Вид станка
Габариты, м	2,8 *1,05* 0,55	3,84*0,97*1,3	4,57*0,84*1,5	3,55*0,62 *1,3	4,2*0,81*0,63	
Профили						
Кол-во клетей	10	7	8÷10		10	
Производ-сть, м/мин	12,2	12,7	12,2	15,2	12,2	
Потребляемая мощн., кВт	1,5	11,8	1,1		5,5	
Толщина материала, мм	0,4÷0,8	0,5÷1,1	0,3÷0,8	0,4÷0,8	0,7÷1,8	
Привод на валы	Гидравлич.	Гидравлич.	Механич.	Гидравлич.	Гидравлич.	
Возмож-ть переналадки на другой профиль	До 5 видов профилей	Отсутств.	До 5 проф. без замены оснастки	На 2 проф. разн. ширины	В пределах ширины на С и U проф.	
						
						
						
						
						

Технические характеристики станков фирмы «Dynaform»

Наименование характеристики	Модель станка			
	3R	4R	6R	8R
Толщина ленты, мм	0,2 - 0,8	0,4 - 1,5	1,2 - 2,0	1,8 - 3,5
Ширина ленты, мм	100/200/300		150/250/350	
Количество клеток	8 - 23			
Межклетевое расстояние, мм	120/150	190/210	150/300	320/360
Межосевое расстояние, мм	78 - 96	70 - 120	96 - 140	115 - 150
Диаметр валов, мм	30	40	60	80
Мощность двигателя, кВт	4 - 18	7,5 - 18	15 - 30	18 - 35
Производительность, м/мин	20/30/40			

Профилегибочные машины «Duplex» итальянской фирмы «Dallan» имеют 12 рабочих клеток с двойными раздвижными рабочими узлами, позволяющими формировать профили различной ширины с толщиной стенки до 2 мм. Скорость профилирования – от 30 до 120 м/мин. Компания «Piemme» (Италия) производит автоматизированные линии на базе профилегибочных станков с количеством клеток от 20 до 40. Особенности станков: передача момента в клетки крестовиной на оба вала; серьга регулируемая – эксцентриковая; за последней клетью расположены датчики, измеряющие отклонение профиля от заданных параметров; рукоятки управления – маховики; имеется возможность смещения серьги с заменой валов для любой ширины (от 100 до 1500

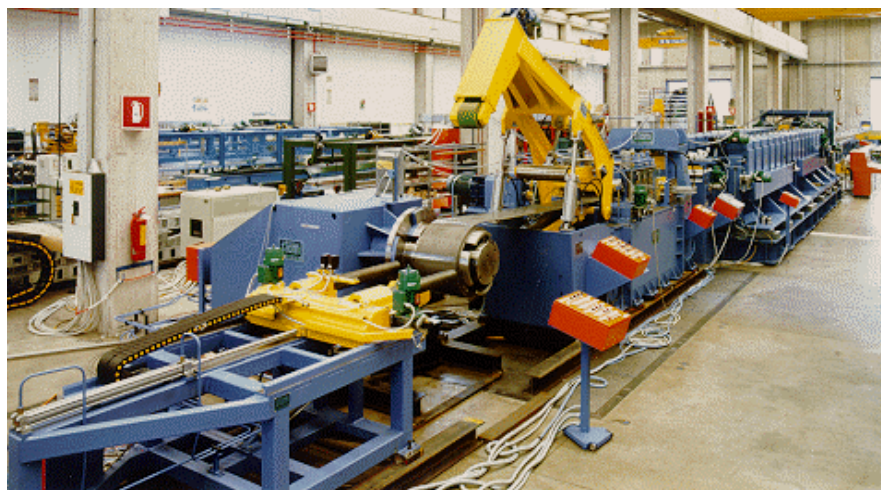


Рис. 1.47. Линия итальянской компании «Stam»

мм) [3]. Итальянская фирма «STAM» изготавливает профилегибочные агрегаты с числом клеток – до 32 для производства профилей толщиной от 4 мм и высотой до 108 мм для силовых конструкций в строительстве (рис. 1.47) [179]. Компания «Il-Kwang» (Южная Корея) специализируется на производстве оборудования для изготовления разнообразных профилей (в том числе с заданной продольной кривизной), гофр, сэндвичевых панелей с полиуретановым наполнителем [180]. Профилегибочные машины этой компании имеют обычно не менее 12 клеток (рис. 1.48). Скорость профилирования не превышает 30 м/мин.

Южнокорейская компания «RF ENGINEERING» выпускает профилегибочные станки для производства тонколистовых панелей с толщиной стенок от 1,0 до 1,6 мм из стали, алюминиевых сплавов и меди. Технические характери-

стики станков: количество клеток – от 7 до 30; диаметры валов $\varnothing$ (70 – 100) мм; скорость профилирования 5 – 20 м/мин. Валы на клетях устанавливаются как консольно, так и по двухопорной схеме.

Канадская фирма «Samco» производит автоматизированные линии [3], включающие профилегибочные агрегаты с количеством клеток от 8 до 18 (рис.1.49). Рабочие клетки агрегатов могут быть как двухопорными с общим приводом через конические передачи или же с отдельным приводом от индивидуальных редукторов, так и консольными - с двойными рабочими валами, расположенными друг против друга с возможностью изменения расстояния между ними в горизонтальной плоскости (так называемая «система дуплекс») (рис.1.50).

Профилегибочные установки финской фирмы «Sintech» [181] состоят из 13 профилирующих клеток с цепным приводом только верхних валов и предназначены для формообразования профилей из тонколистового металла с производительностью до 30 м/мин (модели с большим числом клеток могут иметь скорость до 80 м/мин) (рис. 1.51). Межклетьевое расстояние в установках составляет 365 мм.

Аналогичное оборудование выпускают фирмы «Кометаль» (Франция) [182], «Формак» (Италия) [183], «Шлебах» (Германия) [184] и ряд других зарубежных компаний.

Из описания и анализа профилегибочного оборудования зарубежных компаний выявлены его основные конструктивные характеристики:

- большое количество клеток (преимущественно от 12 до 52);
- конструкция клеток в основном консольная (замыкание серьгами);
- межклетьевое расстояние – от 350 до 900 мм;
- регулируемый по высоте преимущественно верхний вал;
- привод большей частью на нижний и верхний валы клетки;
- специальные правильные устройства как правило не применяются;
- направляющие устройства применяются на всех станах;



Рис. 1.48. Профилегибочная машина компании «Il-kwang»



Рис. 1.49. Двухстоечная схема профилегибочного стана компании «Самко»

- в редких случаях в комплект входят межклетьевые проводки;
- производительность – в основном до 30 м/мин.

Имеет место тенденция к объединению оборудования в профилегибочные линии [185]. Фирма Erling Jensen разработала многопарнораликовые маши-



Рис. 1.50. Клеть с компоновкой «дуплекс» в профилегибочных агрегатах фирмы «Самко»

ны для профилирования оцинкованной и окрашенной ленты, встраиваемые в линии, содержащие подающие устройства, пробивные головки, устройства резки и формовки. Управление линией осуществляется с помощью ЭВМ. Фирма Bigwood Ltd. осуществила разработку линии, отличающейся быстротой переналадки, синхронизацией профилегибочной машины с прессами и отрезными устройствами, автоматизацией установки рулонов в разматыватели [186]. Компания Draytem-Werk Maschinenbau освоила сдвоенную машину профилирования и гибки по контуру [187].



Рис. 1.51. Профилегибочный стан компании «Sintech»

Профилегибочное оборудование зарубежных стран хотя и обладает определенными достоинствами, однако оно рассчитано в основном на крупносерийное производство и требует серьезных капитальных затрат на его приобретение (см. раздел 1.2). Это объясняется тем, что гораздо выгоднее специализировать-

ся на определенной номенклатуре профилей и производить их обмен или покупку-продажу в рамках кооперации. С этой целью в Великобритании в 1994 создана ассоциация предприятий по профилям [188]. Однако такое разделение труда является выгодным для небольшой страны, поскольку при больших расстояниях издержки транспортировки могут становиться соизмеримыми с прибылью, что является причиной ограничения рынков сбыта пространственным фактором (обычно в радиусе 500 км продается до 65 % профильной продукции, а в радиусе свыше 700 км – всего 15 %) [63]. Для обширных территорий России более приемлем вариант компактного и недорогого оборудования, обладающего достаточной степенью универсальности, с целью обеспечения возможности рассредоточения центров производства профилей при минимальных капитальных затратах в условиях финансового дефицита.

1.5.1. Профилегибочное оборудование российских компаний

Из отечественных разработчиков и производителей профилегибочного оборудования наибольшей известностью пользуется Украинский НИИ Металлов (УкрНИИМет), выпускавший в советскую эпоху высокопроизводительные станы (табл. 1.15) для промышленного производства широкого ассортимента профилей разнообразной конфигурации из углеродистых, конструкционных и низколегированных сталей (ширина заготовок – от 30 до 1500 мм, толщина - от 0,5 до 8,0 мм) [1]. В конструктивном отношении станы УкрНИИМет выполнены по двухстоечной схеме с приводом на один или оба вала клетки преимущественно через карданные валы. Профилегибочные станы УкрНИИМет поставлялись в основном на металлургические заводы страны для серийного производства профилей и содержали значительное количество клеток (см. табл. 1.15) с рабочими валками диаметром свыше 350 мм [83]. Данное оборудование нецелесообразно применять в мелкосерийном производстве ввиду высокой стоимости оснастки и самого оборудования.

Таблица 1.15.

Технические характеристики станов УкрНИИМет

Технические характеристики	1-7х80 - 500	1-4х400- 1500	1-8х60- 730	2-6х50- 500
Толщина полосы, мм	2 - 7	1 - 4	1 - 8	2 - 6
Длина профилей, м	3 -12	2,5 -12	2 -12	2 -12
Максимальная высота сечения, мм	160	200	115	115
Производительность, м/мин	30 -150	30 -180	7,2 - 20	3,5 - 9
Количество клеток	14	20	10	14
Мощность привода, кВт	800	600	58	46
Количество электродвигателей	2	2	2	2
Диаметр верхних валков, мм	540	614 - 658	375	375
Диаметр нижних валков, мм	230	302	150	150
Диаметр валов стана, мм	170	230	110	110
Макс. давление металла на валки, кН	300	200	120	160
Макс. крутящий момент, кН·м	9,55	3,15	2,4	2,4
Межклетьеовое расстояние, мм	1400	1200	1060	1060

Профилегибочное оборудование компании «Альта-Транс» (г. Москва) предназначено для производства тонкостенных профилей из рулонных сталей с покрытием толщиной от 0,45 до 0,60 мм [189]. Схемы компоновки профилегибочных станков (рис. 1.52) – двух-опорные; привод – электромеханический на нижние валы через цепную передачу; число клеток – от 14 до 20; направляющее устройство содержит ванну для

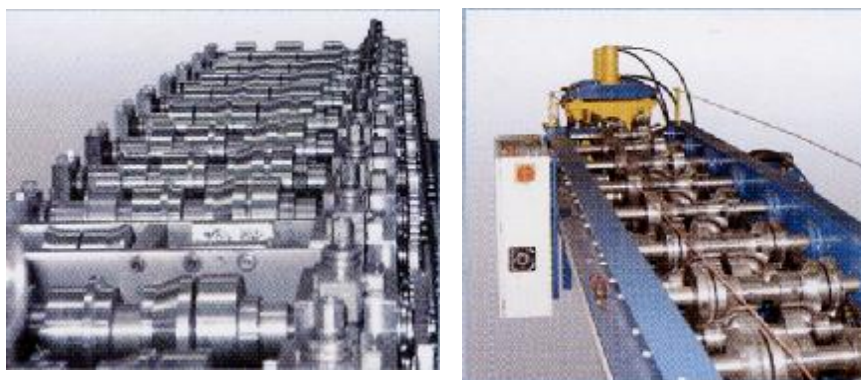


Рис. 1.52. Станки компании «Альта-Транс»

смазки ленты-заготовки; мощность двигателей – 3,3 кВт, скорость профилирования не превышает 10 – 16 м/мин.

Профилегибочные станки (рис. 1.52) обычно входят в состав автоматизированных линий по производству фасонного проката, включающих также разматыватель, пресс для перфорации профиля, отрезное устройство и приемный стол со сбрасывателем (рис. 1.53).

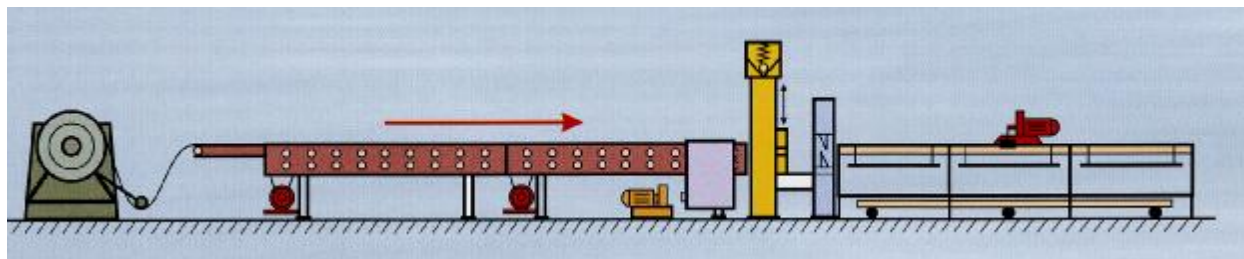


Рис. 1.53. Компонировка автоматизированной линии компании «Альта-Транс»

К недостаткам профилегибочного оборудования компании «Альта-Транс» следует отнести ограниченные технологические возможности (по регулировкам валов и толщинам заготовок), а также большое число клетей.

Профилегибочные станы ООО «Аркада» (Смоленск) построены по модульному (блочному) принципу [190]. Блок состоит из пяти клетей; привод через шарнир осуществляется на верхний или нижний вал; между валами имеется зубчатая передача. Оборудование этой фирмы имеет большую массу, сравнительно высокую цену (табл. 1.16) и предназначено для серийного производства профилей. Из табл. 1.16 видно, что стоимость комплекта оснастки составляет более 30 % стоимости основного оборудования, в то время как для технологий интенсивного формообразования профилей этот показатель едва превышает 10 %.

Таблица 1.16

Технико-экономические характеристики станов ООО «Аркада»

Тип стана	Ширина заготовки, мм	Потребляемая мощность, кВт	Количество клетей	Скорость профилирования, м/мин	Мин. и макс. толщина полос, мм	Длина стана, м	Масса стана, т	Масса валковой оснастки, т	Стоимость стана с одной инструментальной наладкой, т. у. е.	Стоимость комплекта валковой оснастки, т. у. е.
1	200	15-25	10-15	До 40	0,2 – 2,0	4-6	6-9	2,4-3,6	35-51	10-18
2	400	18-30	10-15	До 40		4-6	8-12	3,0-4,5	50-65	16-25
3	1200	25-40	15-25	До 30		6-10	15-25	4,5-6,0	75-95	21-35

ООО «Аркада» также производит «под ключ» автоматизированные линии по производству профилей (рис.1.54), рассчитанные преимущественно на массовое производство профилей в условиях металлургических заводов. Ввиду ограниченного числа клетей, скорость профилирования не превышает 40 м/мин.

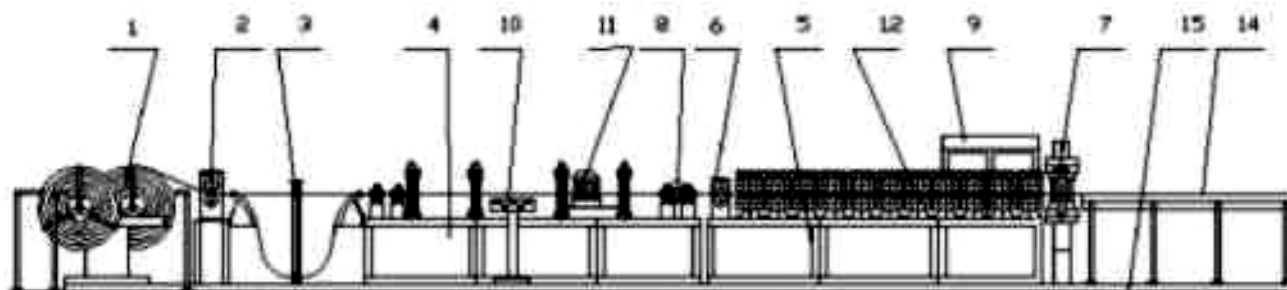


Рис. 1.54. Линия ООО «Аркада»: 1 – разматыватель; 2 – устройство подающее; 3 – компенсатор петлевой; 4 – установка пробивки; 5 – стан профилегибочный; 6 – установка ротационная; 7 – установка отрезки профиля; 8 – устройство измерительное; 9 – устройство электрическое; 10 – пульт управления; 11 – устройство гидравлическое; 12 – наладка инструментальная; 13 – стол приемный; 14 – рама монтажная; 15 – станина

В 1982 – 2003 гг. ОАО «Ульяновский НИАТ» разработало ряд станков семейства ГПС для мелкосерийного производства профилей, в первую очередь для нужд авиационной промышленности (табл. 1.17) [37].

Таблица 1.17.

Станки семейства ГПС (ОАО "Ульяновский НИАТ")

Модель станка	Год разработки	Число клеток	Профили для ЛА	Примечания
1.ЭГПС-1	1983	2	-	Øвалов 41 мм
2.ГПС-200	1986	4	(«Буран») (ЯК-48)	Øвалов 65 мм
3.ГПС-200 М	1987	● 1 + 4	ИЛ-114	Øвалов 65 мм
4.ГПС-200М1	1989	● 1 + 4	(ТУ-204)	Øвалов 50 мм
5.ГПС-300	1991	4	ИЛ-103	Øвалов 50 мм
6.ГПС-300М	1993	4	ТУ-334	Øвалов 50 мм
7.ГПС-300М6	1995	6	БЕ-200	Øвалов 50 мм

● – Подающая клетка с приводными валами.

При разработке станков ГПС учитывались требования экономичности и функциональности: достаточное количество клеток, оптимальное межклетьеовое расстояние, жесткость рабочих валов и клеток, привод крутящего момента на оба вала клетки, возможность использования вспомогательных устройств, автоматизации, удобства и быстроты переналадки. Ряд вопросов, связанных с расчетами числа клеток, энергосиловых параметров, параметров жесткости, назначения межклетьеового расстояния, был решен одним из авторов данной книги.

Широкая номенклатура производимых и вновь разрабатываемых конструкций гнутых профилей вызывают необходимость разработки целесообразной гаммы профилировочного оборудования, призванного удовлетворить запросы заказчика в технологическом аспекте (технологические возможности, эксплуатационная надежность и другие) при обеспечении оптимума капитальных и эксплуатационных издержек. Примером инноваций в этом отношении являются компании ООО «Спецтехнология» и ООО «НПО«ИДМ» (г. Ульяновск) – раз-

работчики и производители автоматизированных / автоматических линий для изготовления профилей из металлической ленты.

Типовой состав линии производства гнутых профилей включает разматывающее устройство, профилировочный станок, отрезное устройство. Расширение технологических возможностей линий достигается включением в их состав перфорирующих устройств или прессов с подвижными штампами. Состав различных типов автоматизированных линий приведен в табл. 17-а.

Таблица 17-а

Состав автоматизированных линий разработки ООО «ИДМ»

Перечень агрегатов, входящих в состав автоматизированных линий	Условное обозначение и состав линии					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Рулонница разматывающая	+	+	+	+	+	+
Отгибатель кромок						+
Листоправильная машина					+	+
Ножницы гильотинные						+
Пост сварки						+
Пресс с подвижным штампом пробивки					+	+
Перфорирующее устройство (пневмат.)						
Синхронизатор шага перфорации					+	
Профилировочный станок / стан	+	+	+	+	+	
Пресс с отрезным летучим штампом						+
Пила отрезная с синхронизатором					+	
Отрезное устройство (пневматическое)	+	+	+	+		
Стол приемный (с накопителем)	+	+	+	+	+	+
Электронная система управления	+	+	+	+	+	+
№ 1 – Узкоспециализированная (не переналаживаемая) линия «легкого» типа (толщина заготовки до 1,0 мм); № 2 – Номенклатурно-ориентированная линия «легкого» типа с кассетной сменой инструмента (толщина заготовки до 1,0 мм); № 3 – Универсальная линия «легкого» типа (толщина заготовки до 1,5 мм); № 4 – Универсальная линия «среднего» типа (толщина заготовки до 2,5 мм); № 5 – Универсальная линия «среднего» типа с расширенными технологическими возможностями (толщина заготовки до 2,5 мм); № 6 – Номенклатурно-ориентированная линия «тяжелого» типа с расширенными технологическими возможностями (толщина заготовки до 5,0 мм).						

Основным формующим агрегатом линии является профилирующий / профилегибочный станок / стан, параметры которого определяются преимущественно его назначением. Профилировочные станки / станы разработки ООО «НПО «ИДМ» (изготовитель – ООО «Спецтехнология») имеют одну рабочую зону, цельную или модульную конструкцию с приводом формующих клеток с помощью зубчатой передачи или через карданные валы. Клетки выполнены съемными или в виде кассетного блока; валы монтируются консольно и замыкаются откидными «плавающими опорами». Станки / станы снабжены направляющими и правильными устройствами различных типов. Правильные устройства имеют возможность регулировки в продольном направлении (монтажная регулировка вдоль оси профилирования), по вертикали, горизонтали и враще-

нием правильного блока вокруг оси профилирования с незначительными отклонениями в случае производства эксклюзивных профилей.

В качестве примера ниже дается описание универсального профилегибочного стана СПУ-400К8х65 разработки ООО «Спецтехнология», предназначенного для изготовления методом интенсивного деформирования в роликах мелкосортного гнутого профиля. Стан состоит из двух секций с четырьмя профилирующими клетями каждая, направляющего устройства, правильного устройства и системы управления.

Основными узлами стана являются профилирующие клетки. Клеть представляет собой основание, в котором установлены стойки с перемещающимися по ним ползунами. В ползунах на подшипниках качения установлены рабочие валы. Перемещение нижнего и верхнего ползунов в вертикальной плоскости осуществляется вращением соответствующих винтов. Крутящий момент рабочим валам передается от раздаточной коробки через карданные валы. На рабочих валах клетки при помощи замыкающей опоры закреплены ролики. Замыкающая опора представляет собой основание, в котором установлены стойки с перемещающимися ползунами. В ползунах зафиксированы концы рабочих валов профилирующей клетки. Регулировка перемещения нижнего и верхнего ползунов осуществляется посредством ходовых винтов. Основные технические характеристики стана и профилирующей клетки приведены ниже.

Высота поверхности станины над полом, мм	800
Расстояние от стола до нижнего вала с оснасткой, мм	200
Максимальная глубина профилирования, мм	60
Скорость профилирования, м/мин	8 - 10
Максимальная толщина заготовки, мм	0,5 - 2,0
Максимальная ширина заготовки, мм	360
Клеть профилирующая:	
Диаметр рабочих валов, мм	65
Длина рабочей части валов, мм	400
Регулировка верхнего вала клетки по вертикали, мм	50
Межосевое расстояние между роликами с оснасткой:	
минимальное, мм	130
максимальное, мм	190
Мощность электродвигателя стана, кВт.	11
Частота вращения вала электродвигателя, об/мин	1000

Заготовка, после центрирования в направляющем устройстве, захватывается роликами профилирующей клетки с горизонтальным расположением приводных рабочих валов и подается последовательно в профилирующие клетки. Между профилирующими клетями могут быть установлены промежуточные клетки с роликами или фильерами на вертикальных осях. За последней профилирующей клетью установлено устройство правильное с роликами, которое крепится болтами к торцу станины.

Стоимость типовой линии не превышает 200 тыс. долларов. Срок окупаемости описанных линий не превышает одного года.

1.6. Анализ схем формообразования профилей в роликах

При разработке технологий интенсивного формообразования гнутых профилей в роликах необходимо учитывать ряд факторов этих процессов с целью предупреждения возможных дефектов конечного продукта (см раздел 1.3).

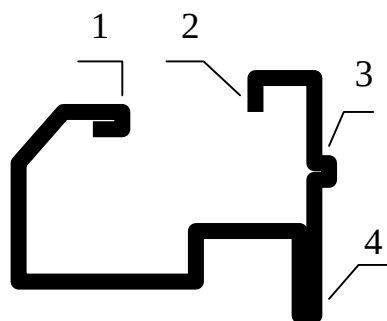


Рис. 1.55. Профиль с элементами жесткости:

1 – элемент двойной толщины; 2 – отбортовка; 3 – рифт; 4 – петельный элемент

Схема формообразования профиля задает конфигурацию калибров роликов и является важнейшим фактором технологического процесса профилирования. Профили изготавливают по различным схемам в зависимости от типоразмера, наличия и вида покрытия, а также вида и размеров элементов жесткости. В последние годы значительно расширилась номенклатура профилей с элементами жесткости [2, 191] при увеличении их числа на одном типоразмере профиля (рис. 1.15) при общей тенденции к использованию преимущественно материалов с покрытием (см. разделы 1.1 и 1.4). Рассмотрим схемы формообразования профилей в порядке возрастания их сложности.

1.6.1. Угловые профили

Равнополочные угловые профили с умеренной шириной полок (до 30...40 толщин заготовки) обычно не создают существенных проблем при разработке технологии в отличие от несимметричных уголков, при отработке технологии которых часто возникают поводки в виде скрутки и прогиба. Но и при разработке технологии изготовления широкополочных уголков, уголков с элементами жесткости типа рифтов, элементами двойной толщины, отбортовками [192] из материалов с покрытием вызывает необходимость изучения возможностей специальных схем формообразования с целью предотвращения потери устойчивости периферийных элементов и нарушений покрытия.

Несимметричные угловые профили можно формовать по схемам, предусматривающим подгибку меньшей полки в роликах основных переходов или в промежуточных вертикальных клетях [96]. Более предпочтительна схема с одновременной подгибкой полок на углы, обратно пропорциональные соотношению ширин подгибаемых полок [193].

Широкополочные уголки из материалов с покрытием можно получать традиционным профилированием швеллера с его последующей разрезкой [194]. Снижение угла скрутки может обеспечиваться перегибом полок и их последующей разгибкой [195]. При наличии элементов жесткости на одной из полок угловой профиль можно изготавливать с применением специальных схем [196], например, с устранимым технологическим рифтом на другой полке [2].

С целью исключения трещинообразования при изготовлении уголков из малопластичных материалов, применяют схему, в которой вертикальными роликами заготовке придают прогиб в межклетьевом пространстве [197].

1.6.2. Швеллерные профили

При изготовлении швеллерных профилей (рис. 1.56) применяют преимущественно схемы формообразования, ориентированные на снижение числа переходов, предотвращение потери устойчивости и продольного прогиба профиля, а также обеспечение характеристик точности поперечного сечения профиля.

Симметричные швеллерные профили (рис. 1.56-а), с соотношением ширины дна и полки не более двух, могут изготавливаться стесненным изгибом [198] путем осадки заготовки в окончателном переходе (рис. 1.57).

При этом углы подгибки по переходам определяют в соответствии с формулой:

$$\alpha_k = \arcsin \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\sin \left(\frac{k \cdot \alpha}{N} \right) + \frac{k}{N} \cdot \sin \alpha \right] \right\},$$

где k – номер текущего перехода; α – суммарный угол подгибки, град; n – число переходов.

Этот способ пригоден для изготовления профилей с шириной полки до 20–25 толщин заготовки при толщине металла более 0,8 мм. В противном случае происходит потеря устойчивости вертикальной полки при осадке с отклонением от плоскостности на готовом профиле или повреждение кромки (особенно у профилей из пластичных материалов с плакировкой). Иные схемы формообразования швеллерных профилей стесненным изгибом в роликах указаны в работе [199]. Для производства швеллерных профилей типа желобов (рис. 1.56-б) можно использовать схемы стесненного изгиба [199], если прямолинейные участки не превышают 30–35 толщин заготовки. В тех же условиях пригодна схема (рис. 1.58), в которой, для повышения точности сечения, подгибку полок совмещают с разгибкой локальных участков донной части профиля [200].

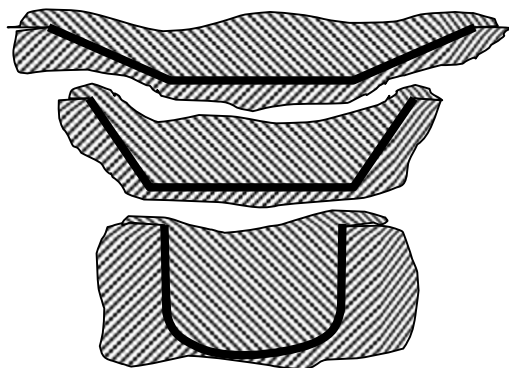


Рис. 1.58. Схема формообразования U – образного профиля

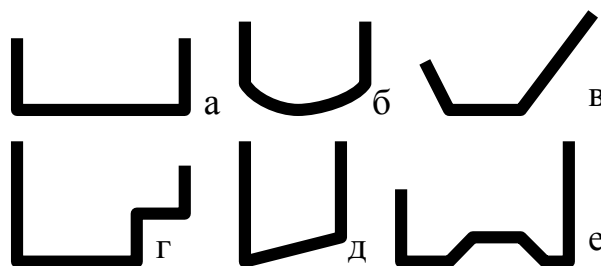


Рис. 1.56. Конфигурации типовых швеллерных профилей

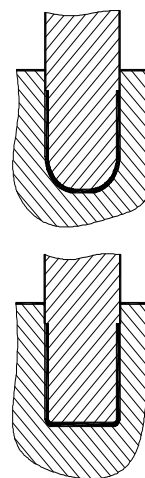


Рис. 1.57. Схема формообразования симметричного равнополочного профиля

При изготовлении неравнополочных швеллеров (рис.1.56-в) часто возникает кромковая волнистость, связанная с различием приобретаемых деформаций полок

[201]; формообразование сопровождается продольным прогибом и винтообразным скручиванием профиля. Существуют несколько схем формообразования, предотвращающих скручивание (рис. 1.59).

В схеме формообразования швеллера с поворотом частей его сечения (рис. 1.60), где моменты сопротивления изгибу частей сечения относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести сечения профиля, равны между собой [202]. Режимы подгибки полки по данному способу представлены на рис. 1.61.

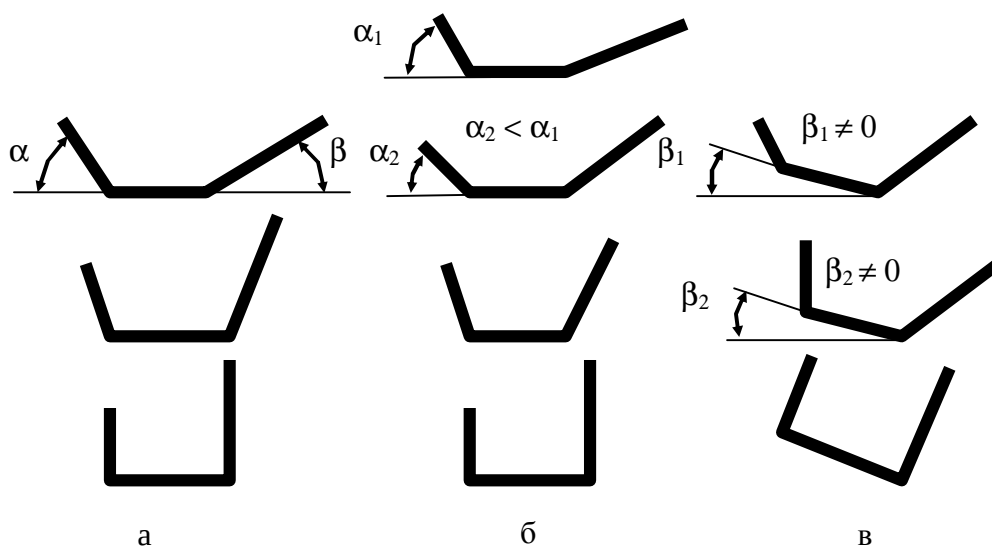


Рис. 1.59. Схемы формообразования, предотвращающие скрутку несимметричных профилей: а) – подгибкой на различные углы; б) – комбинацией подгибки и разгибки; в) – поворотом сечения профиля относительно оси профилирования

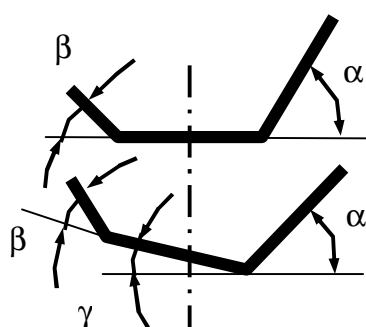


Рис. 1.60. Принципиальная схема формообразования неравнополочного профиля

Значительный поворот сечения при формовке широкополочных профилей с узким дном обычно вызывает искривление полки и появление заусенцев или за-

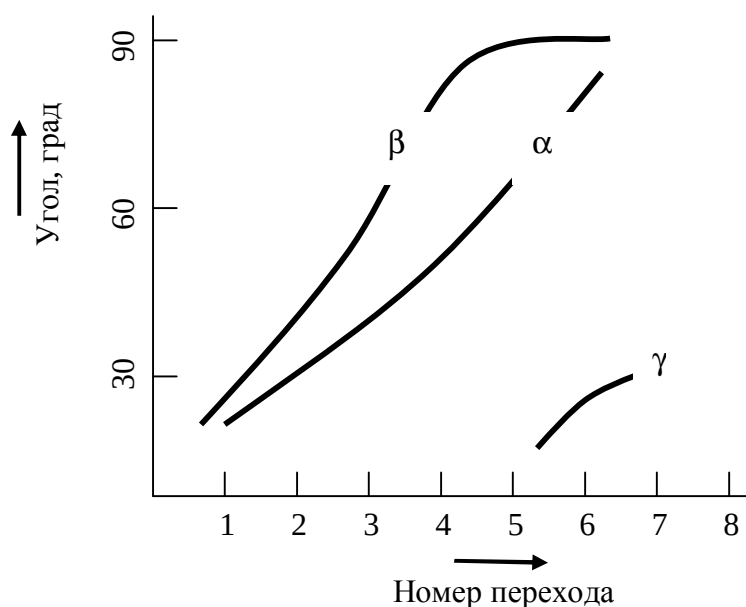


Рис. 1.61. Углы, определяющие режим подгибки неравнополочного швеллера

жимов у торцов. Некоторой модификацией рассмотренной схемы является схема [203], по которой, в каждом переходе профиль размещают с заданной ориентацией одной из главных центральных осей инерции. Продольное скручивание неравнополочного профиля также устраняют поворотом его сечения в предчистовом переходе [204] в сторону большей полки на угол:

$$g = j \cdot (3 - 4)^\circ,$$

где φ - угол продольного скручивания при $\gamma = 0$, град/м.

При этом дно профиля в остальных переходах располагают горизонтально.

Уменьшения винтообразного скручивания можно добиться применением схемы формообразования с уравниванием изгибающих моментов (рис. 1.62), прикладываемых к обеим полкам, с приложением поперечного сжимающего усилия к полке большей длины перпендикулярно плоскости ее торца [205]. Торцевая сила, прикладываемая к большей полке, иногда может приводить к волнистости ее кромки.



Рис. 1.62. Схема действия силовых факторов на полки

Качество угловой зоны можно повысить за счет применения схемы с высвобождением внутреннего контура на каждом из переходов (рис. 1.63) и приложением к торцам заготовки нормального сжимающего усилия P_i , которое определяется формулой [206]:

$$0.9P_{кр} \geq P_i \geq \frac{0.65Q_i}{\sin \alpha_i}, \quad P_{кр} = \frac{4pD}{b},$$

где $P_{кр}$ – критическая сила потери устойчивости полки, Н; Q_i – полное давление стенки на i – ом переходе, Н; α_i – суммарный угол подгибки к i – ому переходу, град; D – цилиндрическая жесткость полки профиля, Н·м; b – ширина полки, мм.

Схема реализуется за 10 переходов. Уменьшение числа переходов до шести при ширине полок профиля более $30S_0$ приводит к кромковой волнистости при значениях, близких к 40 – 50 % от значения критической силы, приведенной в вышеприведенной формуле.

Технология формообразования швеллеров с гладким дном отличается режимами подгибки полок от технологии производства швеллерных профилей с элементами жесткости типа продольных рифтов в донной части (рис. 1.56-г). Схема формообразования профиля с гофрами жесткости (рис. 1.64), предназначенная для исключения трещинообразования у основания гофр и предупреждения волнистости подгибаемых полок [207], предусматривает формовку гофров

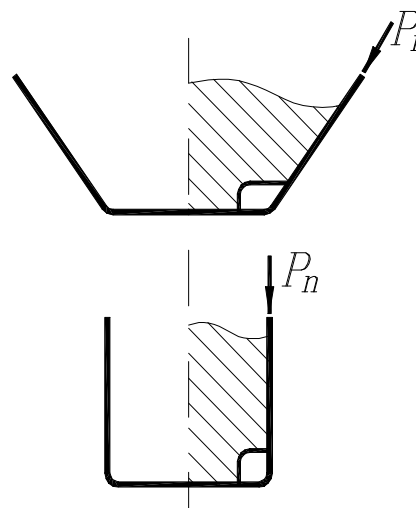


Рис. 1.63. Схема гибки швеллера с торцевым поджатием

в предчистовом переходе. Радиус у основания гофра назначают на 20-30% меньше конечного радиуса мест изгиба профиля при освобождении подогнутых

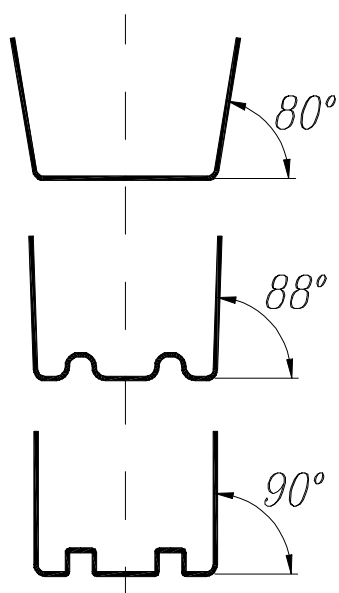


Рис. 1.64. Схема формовки гофра на швеллерном профиле

элементов от зажатия валками, а в чистовом переходе освобождают от зажатия гофры. Эта схема, пригодная лишь для формовки гофр небольших размеров, приводит к значительной боковой утяжке материала и кромковой волнистости в случае формовки гофр больших размеров.

В схеме формообразования неравнополочного швеллера с гофрированной стенкой предусмотрены восемь переходов (рис. 1.65), в которых, при подгибке полок на различные углы, одновременно производят поворот профиля относительно оси профилирования, причем гофры формируют на третьем переходе [208]. Схема мало эффективна для профилей с шириной большей полки, превосходящей 40 толщин материала, из-за появления кромковой волнистости.

Предотвращения кромковой волнистости и улучшения плоскостности подгибаемых полок при гибке профилей с продольными элементами жесткости типа гофр достигают за счет обжатия краевых элементов полосы в пределах упругости по ширине d , определяемой по формуле [209]:

$$d = \frac{(0.42 \dots 0.5) B}{\sqrt{S}},$$

где B – ширина краевого элемента, мм; S – толщина материала заготовки, мм.

Способ требует весьма высокой точности изготовления инструмента [210].

Редко встречающиеся на практике швеллерные профили с переменной по длине шириной стенки (рис. 1.66) формируют роликами, установленными под определенными углами к вертикали [211].

Швеллерные профили со ступенчатыми стенками (рис. 1.56-д) формируют обычно при горизонтальном расположении дна профиля [212, 213]. Схема на рис. 1.67 реализуется в девяти переходах стана 1-4х50-300 и предназначена для предупреждения винтообразного скручивания профиля и кромковой волнистости [212]. Продольный прогиб не превышает 0,8 мм/м, а скрутка – 0,5 градуса.

При изготовлении по данному способу профилей толщиной менее 1 мм за шесть переходов со встречной подгибкой полок часто возникает кромковая волнистость при соотношении ширины плоской полки и ее толщины как 35:1, что хорошо известно из практики традиционного профилирования. Теми же недостатками обладает способ [213], в котором сочетается подгибка полок и перегиб элементов стенки (рис. 1.68). Изготовление профиля лотка размером 100х80х30х2 мм из стали Ст3 согласно этому способу требует семи технологических переходов для предупреждения смятия кромок профиля. В общем случае формовки многоэлементных стенок часто будущие углы закладывают на первых переходах, а на последующих лишь оформляют их к конечному виду.

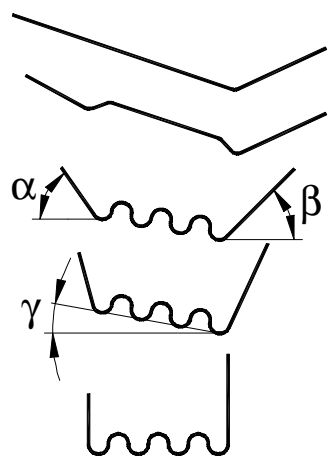


Рис. 1.65. Схема формования неравнополочного профиля с гофрами

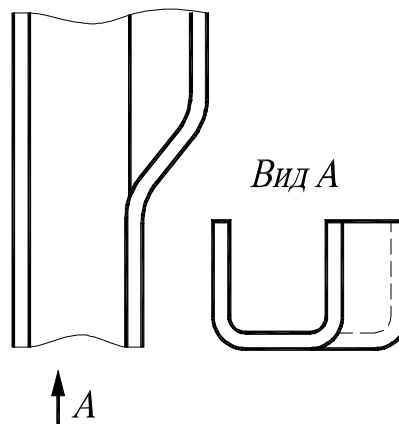


Рис. 1.66. Профиль с переменной шириной полки

Отметим интересное технологическое решение [214], в котором, с целью сокращения числа переходов, подгибку крайних элементов ведут на углы, приводящие к потере устойчивости этих элементов в продольном направлении, а последующую гибку проводят с обжатием по толщине. Схема формования применима для профилей толщиной 1-2 мм.

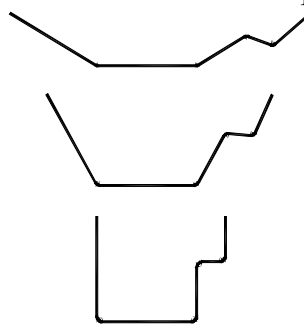


Рис. 1.67. Схема формования профиля со ступенчатой стенкой

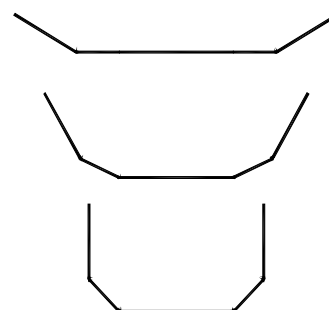


Рис. 1.68. Схема формования швеллера с многоэлементной стенкой

1.6.3. Корытообразные профили

В производстве корытообразных профилей проявляется ряд дефектов, среди которых наиболее серьезными являются продольный прогиб, кромковая волнистость, излом полок, а в случае изготовления несимметричных профилей — их скрутка.

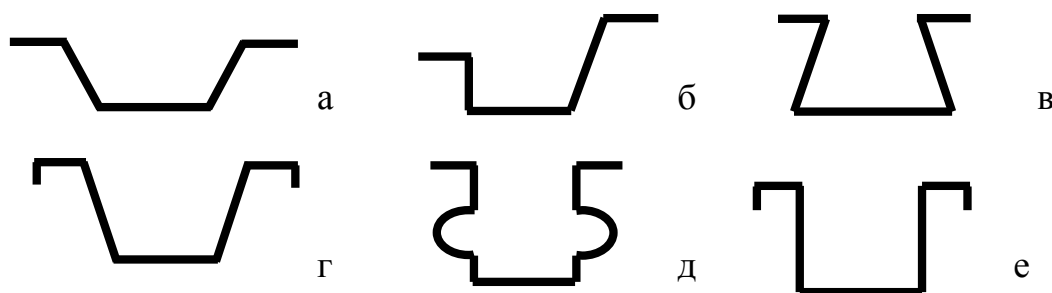


Рис. 1.69. Основные типы профилей корытного типа

Основные типы гнутых профилей корытного типа, формуемых по различным схемам, представлены на рис. 1.69. Профили небольших размеров поперечного сечения с шириной дна до двух высот профиля, можно изготавливать методом стесненного изгиба [215, 216]. При изготовлении профиля за три – четыре перехода широкие горизонтальные полки могут подвергаться потере устойчивости. При этом может иметь место неплоскостность широких боковых полок до 0,4 – 0,7 мм.

Кромковую волнистость и продольный изгиб симметричных профилей (рис. 1.69-а) можно предотвратить за счет равномерного распределения деформаций заготовки по переходам [217] путем смещения кромок заготовки в вертикальной плоскости на расстояния, определяемые по формуле:

$$h_k = (b/2) \cdot [\sin(\alpha_k/N) + (k/N) \cdot \sin \alpha_k],$$

где h_k – высота подъема кромки на переходе k , мм; b – ширина полки, мм; α_k – суммарный угол подгибки, град; N – общее число переходов.

С целью предотвращения утонения в местах изгиба в способе производства гнутых профилей [218] заготовку формуют на предварительных переходах до швеллерного профиля с завышенной шириной донной части, а затем отгибают горизонтальные полки с одновременным сжатием боковых полок до получения профилем окончательных размеров (рис. 1.70). Способ, реализуемый в 13 технологических переходах, позволяет уменьшить утонение с 13 – 15 % до 2,2 – 3,7 %, при этом продольный погиб не превышает 0,1 % (6 мм на 6 метров длины), а кромковая волнистость – 0,7 – 0,9 мм/м.

В способе изготовления гнутого корытного профиля [219] предусматривается приложение нормальных сил к участкам вертикальных полок вблизи зоны сгиба после чистового перехода, а на предварительных переходах центруют заготовку горизонтальными усилиями с последующим обжатием дна профиля с целью улучшения его геометрии (рис. 1.71).

С целью уменьшения числа переходов на 15 – 20 %, повышения качества поверхности и расширения сортамента в способе изготовления гнутых профилей [220] на последних переходах боковые элементы подгибают на $17-35^\circ$ по отношению к стен-

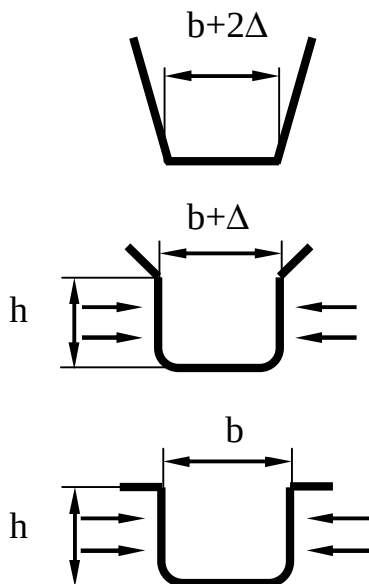


Рис. 1.70. Схема формообразования по способу работы [218]

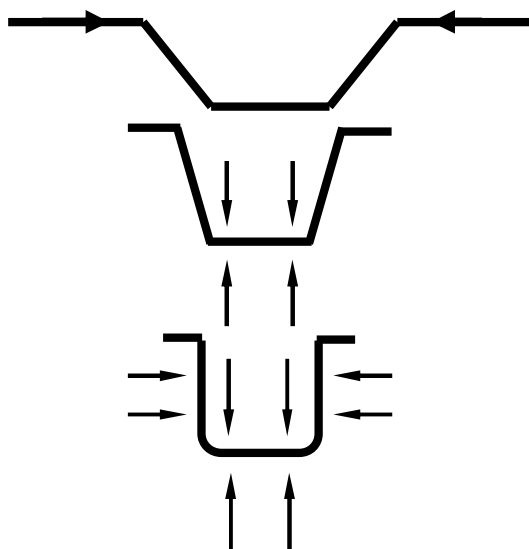


Рис. 1.71. Схема формообразования по способу работы [219]

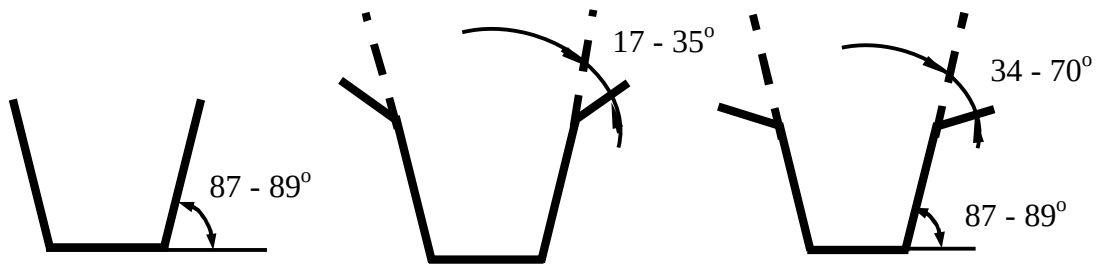


Рис. 1.72. Схема формообразования по способу [220]

ке при суммарном угле подгибки 87-89° (рис. 1.72). Способ реализуется на стане 1-6-50x500 за семь переходов. Способ пригоден для изготовления профилей с небольшими боковыми и горизонтальными полками.

Способ [221], предназначенный для изготовления корытных профилей толщиной 0,5...0,8 мм, преимущественно из цветных сплавов, позволяет расширить технологические возможности за счет приложения к торцам заготовки нормального усилия, а к центральной ее части – радиального усилия при высвобождении боковых элементов (рис. 1.73). Неустойчивость профилирования может возникнуть при изготовлении профилей с широкими полками из-за приложения торцевых усилий к кромкам.

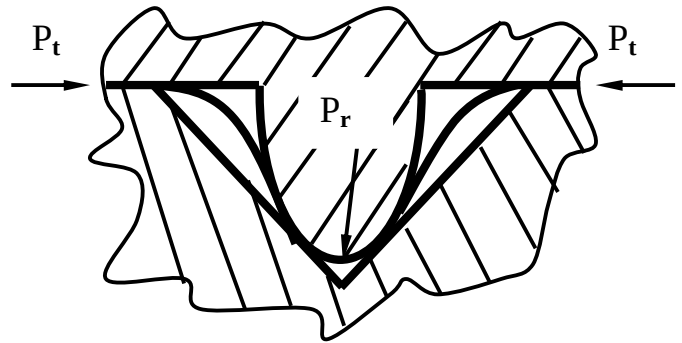


Рис. 1.73. Схема формообразования по способу [221]

При изготовлении профилей с покрытием предотвращение нарушений последнего может достигаться увеличением площади контакта заготовки и инструмента [222] с уменьшением ширины мест изгиба по переходам в соответствии с формулой:

$$b_k = b_n (\eta - [(\eta - 1)(k - 1)] / (N - 1)),$$

где b_k , b_n – ширина места изгиба в текущем и в окончательном переходе соответственно, мм; η – коэффициент увеличения ширины; k – номер текущего перехода; N – число технологических переходов.

В способе изготовления профилей с выпуклым дном и высотой, превышающей ширину более чем в два раза (рис. 1.74), углы подгибки по переходам назначают равными, горизонтальные полки оставляют во всех переходах на одном уровне, а выпуклую часть опускают в каждом из переходов [223]. Эта схема, принятая в одном из разра-

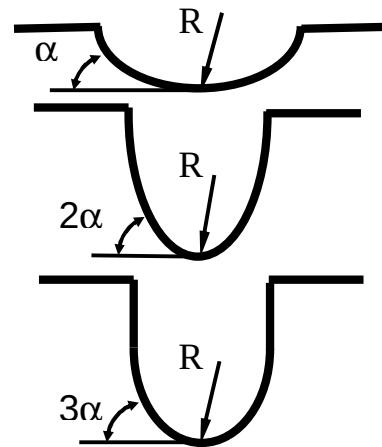


Рис. 1.74. Схема формообразования профиля по способу [223]

ботанных нами способов за прототип, реализуется за шесть переходов и предотвращает кромковую волнистость за счет устранения перемещения горизонтальных полок по вертикали.

Изготовление несимметричных профилей (рис. 1.69-б) связано с предотвращением скручивания, кромковой волнистости и продольного прогиба путем назначения различных углов подгибки полок и применения межклетьевых про-

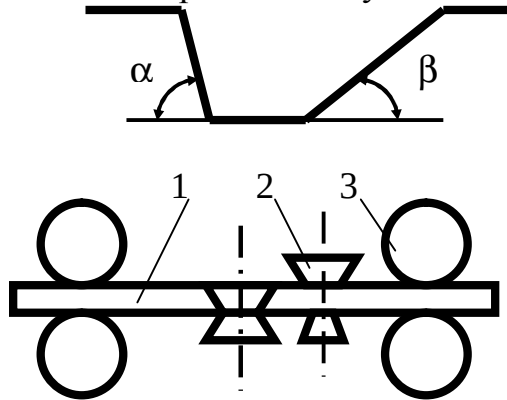


Рис. 1.75. Изготовление профиля по способу [224]:

1 – профиль; 2 – проводки;
3 – формирующие ролики

водок, обеспечивая тем самым равенство активных зон для обеих полок [224]. Рис. 1.75 дает схемное решение этой технологической задачи. Серповидность профиля может стать следствием одностороннего поджатия полок вертикальными роликами. Целесообразнее применение межклетьевых калибров [225], исключающих горизонтальное смещение заготовки.

При изготовлении корытообразных профилей с углами подгибки более 90° (рис. 1.69-в) применяют специальные приемы для расширения технологических возможностей, уменьшения трудозатрат и повышения качества профилей.

Профиль с углами 103° по способу [226] формуют за восемь переходов с одновременным зажатием дна профиля и его горизонтальных полок в предварительных переходах. В двух предпоследних переходах проводят догибку боковых полок на углы соответственно $9-10^\circ$ и $4-5^\circ$ торцевым поджатием кромок, а в последнем переходе высвобождают профиля от зажатия (рис. 1.76). Производство профилей с углами более 90° можно осуществлять путем изменения направления скрутки на различных переходах [227], однако при широких периферийных элементах этот прием может вызвать появление кромковой волнистости. На рис. 1.77 выборочно показаны три перехода из восьми, дающие представление о сути способа.

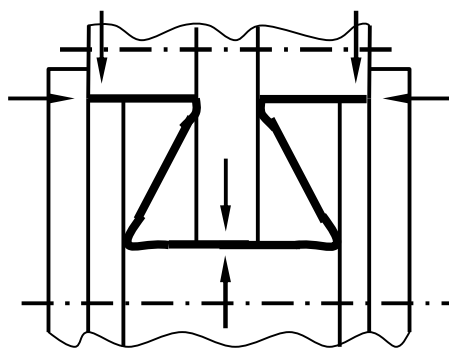


Рис. 1.76. Изготовление профиля по способу [226]

На рис. 1.77 выборочно показаны три перехода из восьми, дающие представление о сути способа.

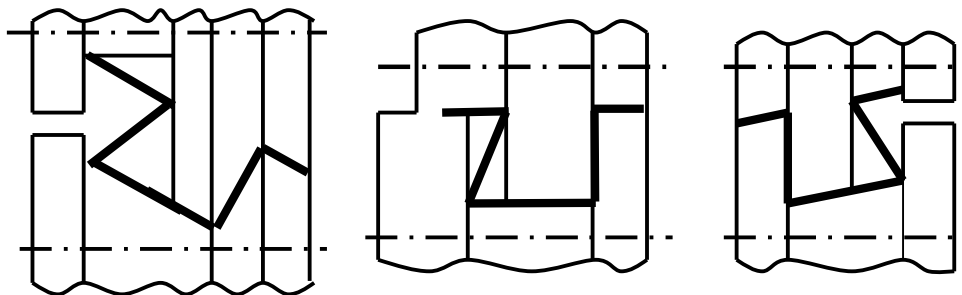


Рис. 1.77. Изготовление корытообразного профиля по способу [227]

При изготовлении профилей корытообразного профиля с поднутрением в верхней части волнистость кромки также является частым явлением. Способ изготовления [228] предусматривает девять технологических переходов для производства тонкостенных профилей с шириной дна от 44 до 244 мм. На первых переходах формуют V – образные отгибы с последующей подгибкой боковой стенки, а в двух последних переходах совмещают дифференцированный обжим заготовки с удержанием мест изгиба и краевых участков (рис. 1.78). Способ пригоден для производства профилей с покрытием и по сравнению с прототипом позволяет уменьшить кромковую волнистость с 1,8 ... 2 мм/м до 0,3...0,5 мм/м, радиусгиба с 2,5...2,8 мм/м до 1,8...2,0 мм/м при обеспечении сохранности покрытия.

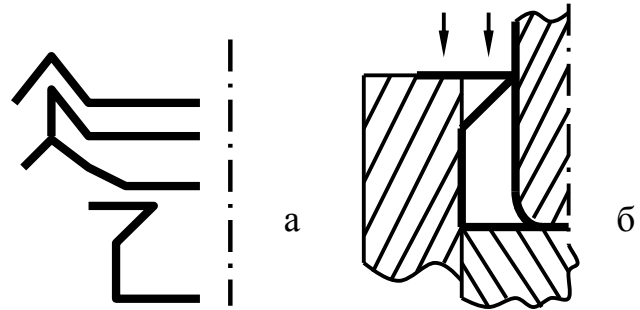


Рис. 1.78. Реализация способа [228]: а) – схема формовки; б) – последний переход

Целью способа [229], реализуемого за восемь переходов, является повышение точности сечения. Это достигается подгибкой горизонтальных полок на $7 - 10^\circ$ в каждом из переходов и формовкой отбортовок до выведения их кромок на высоту, соответствующую их положению в готовом профиле. Затем отгибают полки до горизонтального положения при сохранении неизменным по высоте кромок положения отбортовок (рис. 1.79). Деформирование заготовки к форме корытного профиля при большой ширине горизонтальных полок последнего может вызвать кромковую волнистость, поэтому для уменьшения числа переходов можно рекомендовать совмещение формообразования центральной части профиля с выполнением отбортовок. Подобный прием можно предложить и для совершенствования схемы формообразования профиля с отбортовками (рис. 1.69-г), размер которых соизмерим с высотой профиля (рис. 1.80) [230].

В способе производства корытного профиля с глубокими гофрами наружу на подгибаемых полках (рис. 1.69-д), с целью обеспечения плоскостности отбортовок и прилегающих к ним полок, усилия со стороны внутренней поверхности отбортовок прикладывают по касательной к этой поверхности, а к прилегающим полкам – по нормальным к наружной поверхности (рис. 1.81) [231].

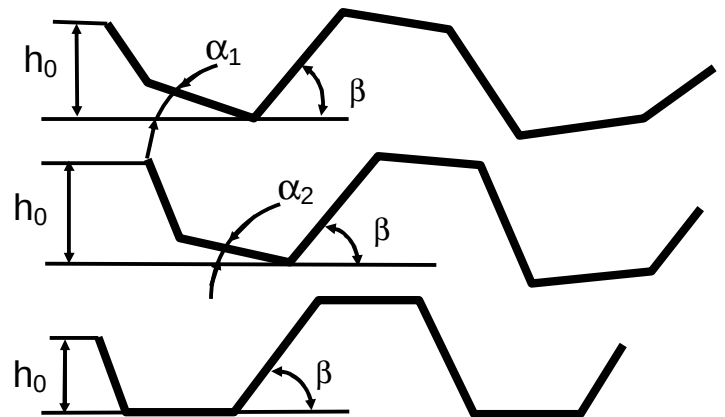


Рис. 1.79. Схема формообразования по способу [229]

Бульбообразное утолщение у отбортовок корытного профиля (рис. 1.69-е) можно получить применением метода стесненного изгиба [165] по прямой или обратной схеме (рис. 1.82). В этом случае возможен излом полки при относительно широком дне профиля и узких горизонтальных полках, когда осадка заготов-

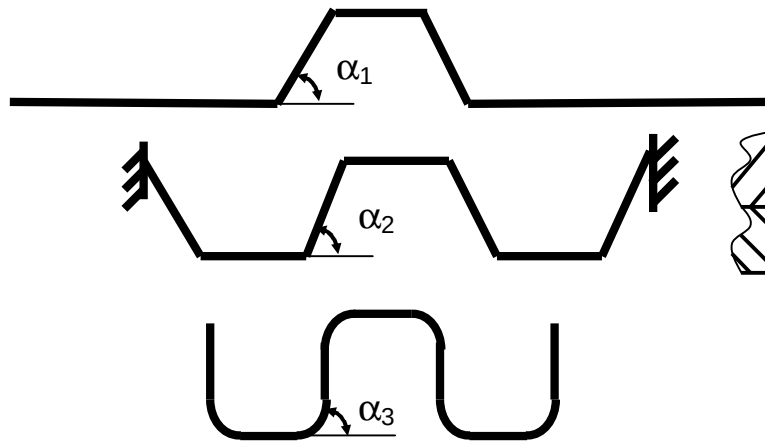


Рис. 1.80. Реализация способа [230]

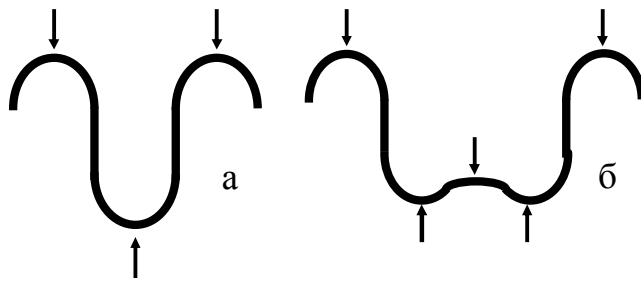


Рис. 1.82. Схема формообразования профиля с бульбообразным утолщением: а) – прямая схема; б) – обратная схема

сительно широком дне профиля и узких горизонтальных полках, когда осадка заготов-

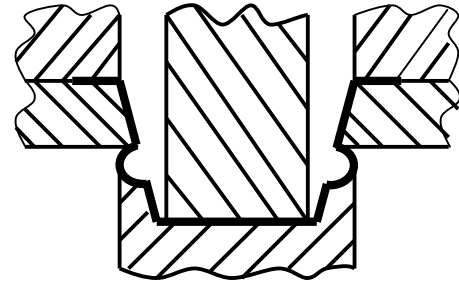


Рис. 1.81. Расположение профиля в калибре по способу [231]

ки приводит к существенному различию продольных деформаций и, следовательно, продольный кривизне профиля, подлежащей устранению правильным устройством [61].

Для выравнивания деформаций по сечению профиля в способе [232] к заготовке прикладывают аксиальные растягивающие усилия до достижения продольной деформации 2...4%.

Обжим донной части профиля способствует достижению указанного эффекта.

1.6.4. С-образные профили

При формообразовании С-образных профилей (рис 1.83) подверженность заготовки и профиля дефектам формы существенно выше, чем при изготовлении корытообразных профилей. В первую очередь это связано с относительно

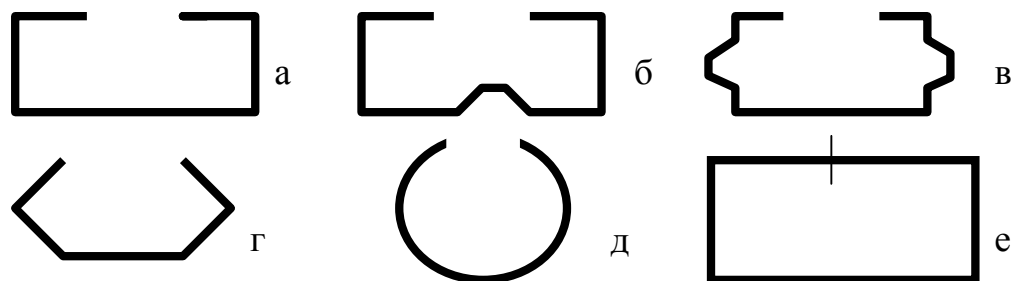


Рис. 1.83. Основные типы С – образных профилей

свободным положением краевых элементов в калибрах из-за отсутствия доступа инструмента в «мертвую зону» формообразования.

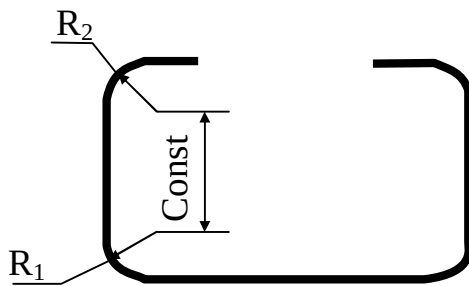


Рис. 1.84. Схема формообразования по способу [233]

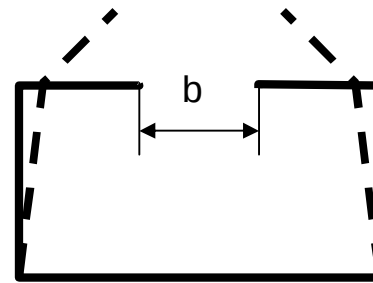


Рис. 1.85. Схема формообразования по способу [234]

В способе [233] повышение точности сечения симметричного С-образного профиля (типовая конфигурация рис. 1.83-а) из оцинкованной стали толщиной 0,5-1,0 мм достигается путем выдерживания заданного расстояния между центрами кривизны зон сгиба с радиусами R_1 и R_2 (рис. 1.84) за счет перетекания материала в зону изгиба с краевых и средних участков. Переформовка угловой зоны с радиусом R_2 вызывает дополнительную продольную деформацию, следствием чего может стать излом кромки. Переформовка связана с дополнительными энергозатратами и создает значительные контактные напряжения, приводящие к повышенному износу валков или нарушению покрытия заготовки.

В способе [234] снижение числа переходов при формообразовании профиля достигают за счет подгибки смыкающихся полок на угол $24...33^\circ$ относительно боковых полок. Радиусыгиба на всех переходах выполняют одинаковыми и равными $1,0...1,33$ толщины, а углы перегиба боковых и горизонтальных полок берут равными $2...3^\circ$ и $1,5...2^\circ$ соответственно (рис. 1.85).

При формообразовании С-образного профиля из Ст3 размером $80 \times 40 \times 15 \times 2,5$ мм за шесть переходов повышение точности достигается первоначально за счет перегиба [235] полок до достижения расстояния между кром-

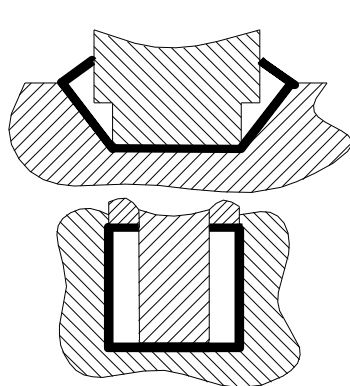


Рис. 1.86. Схема формообразования по способу [235]

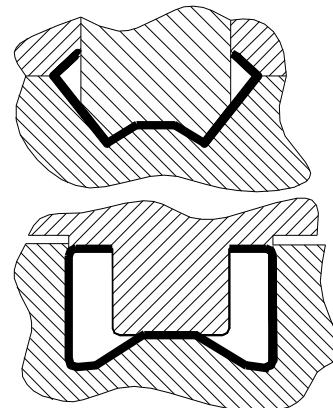


Рис. 1.87. Реализация процесса по способу [236]

ками, равного заданному на готовом профиле, а затем осуществляют разгибку боковых стенок, воздействуя на них через места сопряжения их с полками (рис. 1.86). Наличие широких горизонтальных полках может приводить в этом способе к появлению неисправимым дефектам (потери устойчивости краевых элементов), что требует порядка 10 переходов для обеспечения качества профиля.

Известен способ производства С-образных профилей с гофром жесткости в донной части (рис 1.87, см. также рис. 1.83-б) за 13 переходов, в котором на предварительных переходах осуществляют подгибку будущих горизонтальных полок и формовку рифта одновременно. На последующих переходах производят подгибку боковых стенок с перегибом до 1° , а на последнем переходе заземляют вершину гофра валками [236]. Наличие рифтов в донной части профиля не позволяет задавать большие углы подгибки за переход и в случае изготовления профилей большой высоты при жестких режимах подгибки возникает значительный продольный прогиб и излом или волнистость горизонтальных полок. На профилях толщиной до 0,8 мм у основания рифта могут появляться мелкие гофры под углом около 45° к направлению профилирования или темные полосы, предвещающие потерю устойчивости, напоминающие линии Чернова – Людерса [61].

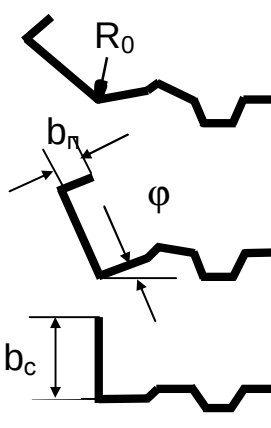


Рис. 1.88. Схема формообразования по способу [237]

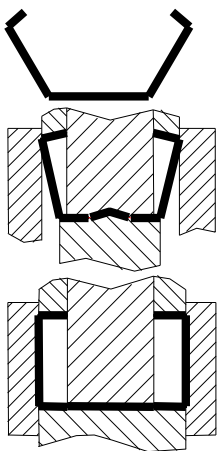


Рис. 1.89. Реализация способа [238]

Формовку нескольких продольных рифтов можно производить одновременно с утонением стенки или последовательно, как в способе [237] изготовления гнутых С – образных профилей (рис. 1.88), где с целью уменьшения пружинения на предварительных переходах периферийные участки стенки отгибают на угол φ с одновременной подгибкой боковых стенок и полок, причем угол φ определяют из неравенства:

$$b_c \cdot \cos(90^\circ - \varphi) - b_p \cdot \sin(90^\circ - \varphi) \geq R_0,$$

где b_c , b_p – ширина боковой стенки и полки соответственно, мм; R_0 – радиус сопряжения дна и стенки профиля, мм.

Формовка рифтов с одновременной подгибкой боковой стенки и полки толщиной до 1 мм с применением межклетьевых проволок для удержания боковых стенок от потери устойчивости позволяет уменьшить число переходов до шести, если высота профиля не превышает 50 мм, а ширина полки – 15 мм. Данный способ прошел технологическую апробацию в ФГУП “Ульяновский НИАТ” и показал его высокую эффективность [61].

В способе [238], реализуемом за 11 переходов, стабилизация расстояния между полками достигается за счет формовки технологического гофра на стенке с одновременной фиксацией кромок полок, последующей отгибки боковых стенок профиля и выпрямления

технологического гофра с обеспечением подгибки боковых стенок на заданный угол (рис. 1.89). При интенсивном формообразовании формовка профиля может быть осуществлена в шести переходах с применением межклетьевых проводок и выполнением технологического гофра, если толщина материала заготовки не превышает 1,2 мм.

Гофры жесткости на подгибаемых полках профиля (рис. 1.83-в) существенно усложняет технологию и технологическое оснащение для его производства в сравнении с изготовлением профилей с гладкими элементами. При этом требуется от 8 до 14 переходов [239, 240].

Технология изготовления С – образных профилей открытого типа с наклонными полками (рис. 1.83-г) в известных способах требует 8 – 10 переходов. Так, в способе [241] изготовления тонкостенного профиля 8х11,5х0,7 мм из оцинкованной стали 08пс с полимерным покрытием на стане 0,5-2х20-300 со скоростью 20 м/мин используют восемь переходов. Формообразование предусматривает предварительную подгибку краевых участков на 90°, последующую подгибку полок и разгибку краевых элементов, а в последнем переходе – осадку полок с удержанием кромок (рис. 1.90). Однако при большой относительной ширине полки применение осадки в этой схеме может приводить к потере устойчивости полок и нарушениям покрытия на торцах и местах изгиба между стенками и полками.

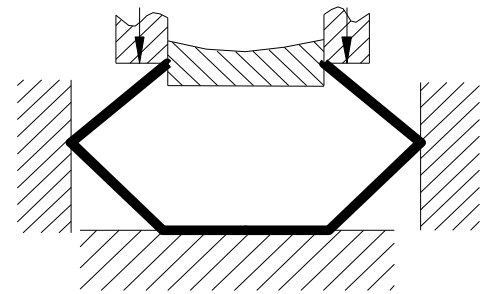


Рис. 1.90. Схема подсадки профиля в способе [241]

Трубчатые С – образные профили (рис. 1.83-д) изготавливают обычно последовательной подгибкой криволинейных участков заготовки (свертыванием). Профили этого типа с толщиной стенок 1 – 2 мм и небольшими размерами поперечных сечений можно изготавливать стесненным изгибом [62] за четыре – шесть переходов. С увеличением радиуса кривизны трубчатого профиля и уменьшением толщины стенки при интенсификации производства таких профилей может возникать потеря устойчивости краевых участков профиля. Предотвращения потери устойчивости можно добиться надлежащим выбором калибров по переходам или использованием межклетьевых проводок.

Для уменьшения пружинения при изготовлении толстостенных С – образных профилей иногда применяют схемы (рис. 1.91) с боковым обжатием и осадкой [242].

За последние годы возросла потребность различных отраслей национальной экономики, в первую очередь строительной индустрии и предприятий – произво-

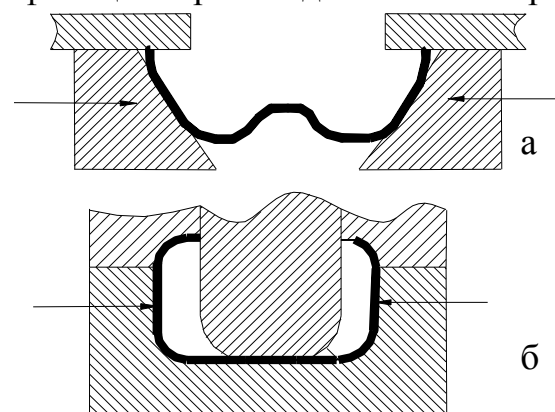


Рис. 1.91. Схема формообразования С – образного профиля:
а) – специальный профиль;
б) – открытая труба

дителей мебели – в замкнутых С – образных профилях (рис. 1.83-е).

Специфичным признаком технологии производства замкнутых профилей, реализуемой обычно за 10 – 20 переходов является сжатие профиля в валках последних переходов [243 – 246]. Практически во всех технологических решениях применяют специальные приемы для устранения депланации стенок и кромок из-за различной жесткости элементов профиля. Например, предотвращение потери устойчивости и искажения формы стенок в способе изготовления профилей коробчатого сечения [247] достигается за счет одновременного или последовательного прогиба элементов профиля на такую величину, при которой деформация прогиба не превышает величины максимальной упругой деформации для данного материала заготовки. Для интенсификации процесса формообразования профилей с толщиной стенок менее 1 мм целесообразно применение внутренних оправок, а в случае необходимости – межклетевых проводок или дополнительных вертикальных клеток.

1.6.5. Зетовые профили

Одной из основных проблем, возникающих при формообразовании зетовых профилей в роликах, является скрутка, а в некоторых случаях и продольная кривизна. Конфигурации сечений этого типа профилей могут быть весьма разнообразными, учитывая возможные элементы жесткости [2], однако для неко-

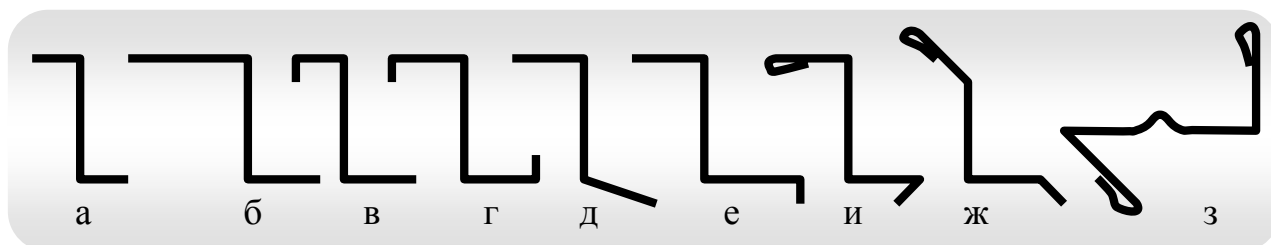


Рис. 1.92. Сокращенная номенклатура зетовых профилей

торых групп этих профилей схемы формообразования могут быть близкими. Рассмотрим сокращенную номенклатуру зетовых профилей (рис. 1.92) для выявления подходов к их формообразованию.

Тонкостенные профили с небольшими габаритными размерами сечения из алюминиевых сплавов (рис. 1.4 и рис. 1.0-а, б, в, г) могут изготавливаться методом стесненного изгиба с плавными формами калибров на предварительных переходах и последующей осадкой на последних переходах (рис. 1.93). В разработке этой технологии автор принимал непосредственное участие [47, 216], что отражено в последующих разделах работы. Зетовые профили из стальных сплавов тол-

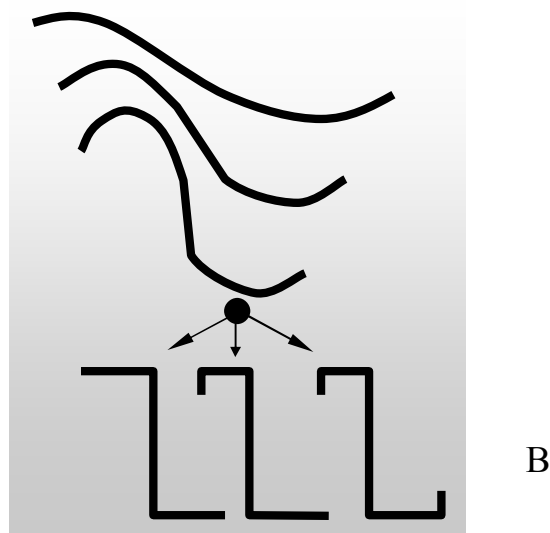


Рис. 1.93. Схемы формообразования авиационных профилей

щиной более 1, 5 мм изготавливают по несколько иным схемам, что связано с вопросами их правки, особенно при поштучном профилировании.

В способе [248] изготовления зетовых равнополочных профилей (рис. 1.92-а) для повышения качества профиля и стойкости валков за счет уменьшения высоты формовки в промежуточных переходах и перепада скоростей по крайней мере в одном из переходов стенке профиля придают волнистую форму, а по достижению угла в 5 – 16 % между полками и горизонтальной линией стенку выпрямляют и полки отгибают до заданного угла (рис. 1.94). При этом зона сгиба одной полки и торец другой находятся на одной горизонтальной линии во всех переходах. Способ реализован при изготовлении равнополочного профиля 120x60x4 мм за восемь технологических переходов на стане 2-8x100-600 и позволил улучшить качество поверхности профилей и сократить энергозатраты на 5...10 %. Продольная скрутка профиля не превышала 0,7 град/м. К сожалению, в способе не указаны режимы формовки криволинейных участков стенки. Данный способ по схеме формообразования аналогичен стесненному изгибу, если формовку производить в закрытом калибре с использованием заготовки с избыточной шириной (осадка криволинейной стенки). Недостатки способа – большое число переходов и возможная неплоскостность стенки вследствие эффекта пружинения. Последняя, впрочем, устранима, если использовать заготовку с избыточной шириной.

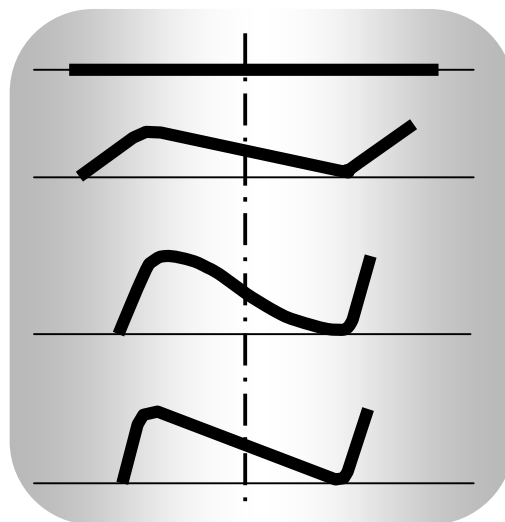


Рис. 1.94. Схема формообразования по способу [248]

Способ изготовления гнутых зетовых профилей проката [249], в котором подгибку полок осуществляют на разные конечные углы (рис. 1.92-д), предназначен для уменьшения винтообразного кручения. Полки подгибают до достижения каждой полкой угла, равного сумме меньшего угла подгибки и полуразности между заданными углами подгибки обеих полок, после чего производят подгибку одной полки и разгибку другой (рис. 1.95). Отдельным пунктом заявлено расположение центров тяжести сечения профиля по переходам в одной плоскости. Данный прием хорошо известен из классических источников [201], однако он требует относительно большого числа переходов. В примере конкретного исполнения для формовки профиля 130x80x80x4 мм с углами подгибки полок 60 и 90° из стали 09Г2 требуется 9 переходов. Методом интенсивного деформирования аналогичный профиль изготавливается за 6 переходов при непрерывном профилировании. В дополнительном пункте также предлагается удерживать

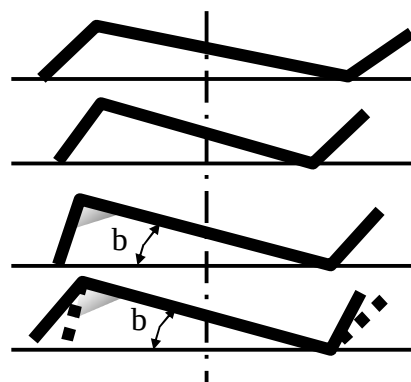


Рис. 1.95. Схема формообразования по способу [249]

место изгиба у основания полки с большим углом подгибки и торец другой полки на одной горизонтали во всех переходах. Заявленные существенные признаки позволяют уменьшить винтообразное скручивание и продольное искривление по сравнению со способом прототипа. Недостаток способа – большое число переходов.

В способе [250] изготовления гнутых неравнополочных зетовых профилей (рис. 1.92-б) с целью предотвращения скручивания и продольного изгиба на

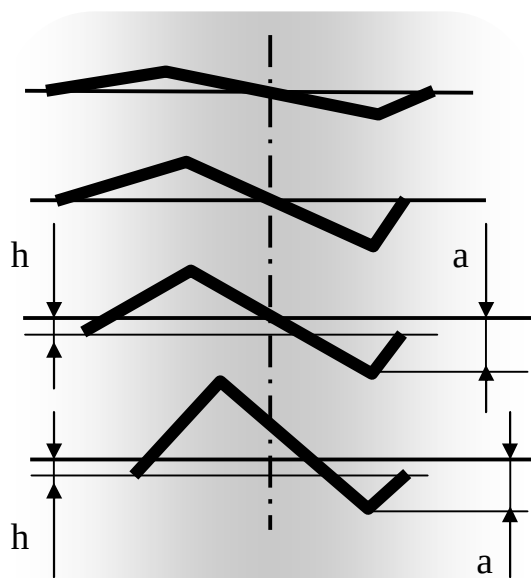


Рис. 1.96. Схема формообразования профиля с различной шириной полок

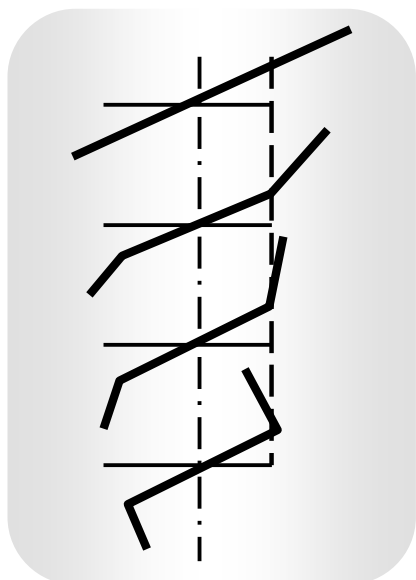


Рис. 1.97. Схема формовки неравнополочного профиля

первых переходах кромки профиля выдерживают на уровне профилирования. После подгибки меньшей полки на заданный угол производят встречную подгибку большей полки и стенки профиля с отформованной меньшей полкой с удержанием в каждом переходе кромки профиля на одинаковом расстоянии от уровня профилирования (рис. 1.96). По данному способу на стане 1-5х100-450 изготавливали гнутый профиль 80х75х35х4 мм из материала сталь 09Г2 за семь переходов. При этом скручивание не превышало 0,5° на 1 м длины, а продольный изгиб устранялся полностью. По сути способ практически совпадает с одним из зависимых пунктов формулы изобретения работы [249] и имеет те же недостатки.

Известен также способ изготовления гнутого неравнополочного зетового профиля [251], в котором заготовку в первый калибр подают под углом α , а в последующих калибрах на этот же угол по отношению к горизонтали наклоняют среднюю часть поперечного сечения заготовки. Причем полки подгибают на равные углы: большую вверх, а нижнюю – вниз при расположении зоны сгиба, примыкающей к большей полке, на одной прямой, параллельной оси профилирования (рис. 1.97).

Угол α определяется формулой:

$$\alpha = \arctg \frac{b_1}{h},$$

где b_1 и h – ширина малой полки и стенки.

Цель изобретения – снижение числа переходов. Способ реализуется на восьмиклетьевом стане 0,3-1,5х20-90 с межклетьевым расстоянием 300 мм разработки ОАО «Магнитогорский меткомби-

нат» при изготовлении профиля 20x30x40x1 мм. Режим подгибки: 0-10-20-34-50-66-80-88-90°. Скрутка профиля не превышала 1° на 1 метр длины, объем брака был менее 0,3 %. В данном способе число переходов остается достаточно большим. Методом интенсивного деформирования аналогичные профили с толщиной стенок до 1, 2 мм формируются обычно за 5 – 6 переходов. Однако для режимов подгибки надлежит предусматривать специальную процедуру оптимизации углов по переходам во избежание кромковой волнистости большей полки.

Для изготовления зетового профиля с отбортовкой одной из полок (рис. 1.92-е) и С-образного профиля разработана двадцатиклетевая профилегибочная машина [252], на которой реализуется следующая технология: в первых десяти клетях осуществляется подгибка одной из полок и выполнение отбортовки на другом конце заготовки при их встречном движении; в последующих десяти клетях производится отгибка полки с отбортовкой (рис. 1.98).

В работе [253] для тех же целей предложена более совершенная конструкция профилегибочной машины, в которую введены телескопические узлы рабочих валов для обеспечения более широких технологических возможностей в отношении изготавливаемой номенклатуры профилей.

Указанные профилегибочные машины являются специализированными для производства двух типов профилей, хотя и с достаточно широкими технологическими возможностями. Однако реализованная на них технология является многопереходной, а сами машины достаточно громоздкими и приемлемыми лишь для поточного производства профилей узкой номенклатуры.

В способе [254], предназначенном для производства зетовых профилей с элементом двойной толщины на одной полке и отбортовкой на другом (рис. 1.92-и), на предварительных переходах одновременно формируют элемент двойной толщины и отбортовку до их окончательной конфигурации. В последних переходах формируют полку с элементом двойной толщины одновременно с полкой, несущей отбортовку, причем, угол подгибки полки с элементом двойной толщины относительно горизонта при-

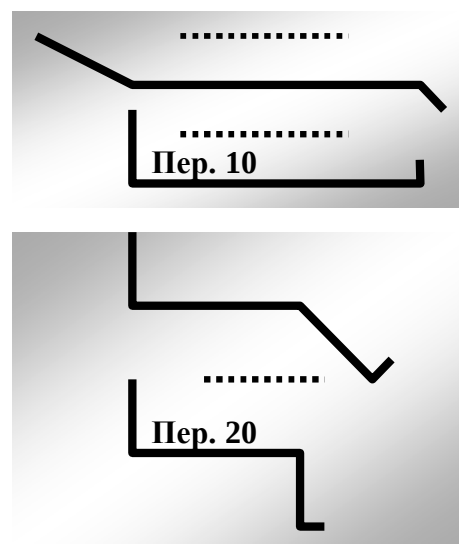


Рис. 1.98. Схема формования профиля с отбортовкой

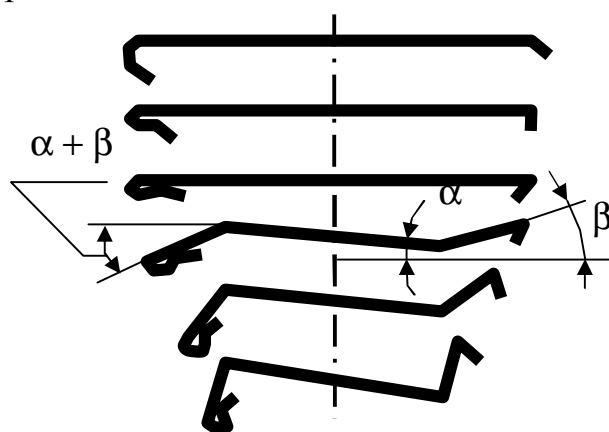


Рис. 1.99. Формовка профиля с элементом двойной толщины и отбортовкой

нимают равным углом подгибки стенки и другой полки, прилегающей к отбортовке (рис. 1.99).

Цель изобретения – предотвращение скрутки и уменьшение количества переходов. Недостаток способа – большое число переходов (десять). В схемах интенсивного деформирования формовка элементов жесткости (элемента двойной толщины и отбортовки) производится обычно одновременно с подгибкой полок. При этом число переходов по сравнению с последовательной формовкой, принятой в традиционном профилировании, сокращается в 1,5 – 2 раза.

При производстве настилов клеток для содержания птицы применяют способ [255] изготовления гнутых Z-образных профилей с элементами жесткости (рис. 1.92-ж), в котором предупреждение винтообразного скручивания достигается тем, что на первых переходах подгибают отбортовку на $45 - 60^\circ$ и од-

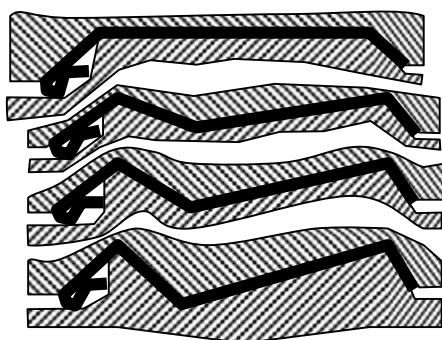


Рис. 1.100. Схема формовки профиля на средних переходах в способе [255]

новременно формуют элемент двойной толщины. На промежуточных переходах, фиксируя профиль на полученном угле отбортовки, производят формовку полки, прилегающей к элементу двойной толщины, и окончательную формовку отбортовки, а в последних переходах осуществляют окончательную формовку всех элементов, выдерживая при этом вершины крайних углов профиля на одном уровне (рис. 1.100). Данный способ реализуется за 15 технологических переходов на стане 0,5-3х50-500 со скоростью 30 м/мин.

В процессе отработки технологии установлено, что угол скручивания увеличивается с увеличением ширины полок, предела текучести и уменьшается с увеличением толщины металла. Для предотвращения скручивания в процессе профилирования необходимо, чтобы сумма скручивающих моментов равнялась нулю. Предотвращение пружинения в данном способе достигается перегибкой элементов. Недостаток способа тот же, что в работе [254].

Отметим, что элементы жесткости, в том числе отбортовки, повышают несущую способность профилей, хотя Национальный институт стандартизации США в 1986 г. разработал технические условия на зетовые профили, где повышение жесткости предусмотрено только за счет ребер жесткости, перпендикулярных полкам (то есть отбортовок). В публикации [256] на основе испытания 46 образцов Z – образного профиля с отбортовками, расположенными под разными углами к полке (от 0° до 80°), показано, что профили с отбортовками могут успешно конкурировать с вышеуказанными профилями при общем снижении технологических затрат.

В способе [257] изготовления полузамкнутых Z-образных профилей с концевыми элементами двойной толщины и центральным рифтом на стенке (рис. 1.92-з) первоначально формуют элементы двойной толщины и центральный рифт. Далее, по рифту производят фиксацию профиля в валках, затем производят подгибку полок с приложением противоскручивающих усилий по биссектрисам углов до окончательной конфигурации профиля, а на последних переходах после калибровки профиля осуществляют его правку поворотом в сторону, противоположную скручиванию, с одновременным приложением аксиальных растягивающих усилий (рис. 1.101).

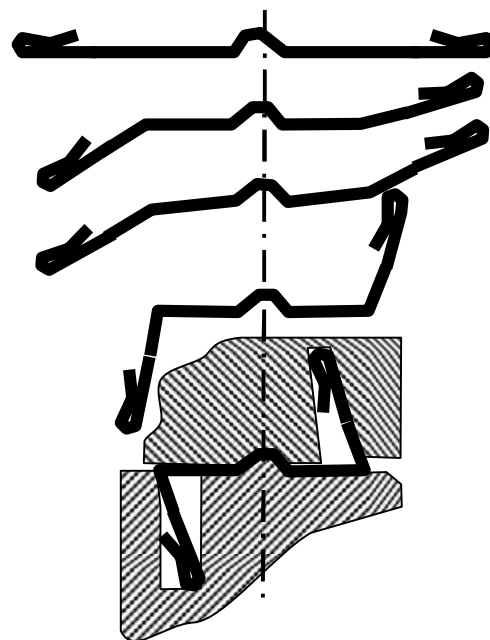


Рис. 1.101. Схема формообразования профиля по способу [257]

По данному способу формовали профиль поилки для птицы из заготовки 0,6х94 мм из оцинкованной стали за 10 основных и 8 промежуточных переходов на стане 0,5-2х50-600 с межклетьевым расстоянием 400 мм со скоростью профилирования 30 м/мин. Аксиальное усилие при калибровке обеспечивалось за счет приращения диаметров формующих роликов.

Способ позволяет получать профили с углом скручивания в пределах 1° на 1 погонный метр при неплоскостности полок менее 1,5 мм по длине детали 1205 мм. При этом достигается экономия материала до 10 % и повышение производительности в 2-3 раза по сравнению с прототипом.

Использованное в данном способе аксиальное растяжение в действительности оказывается эффективной мерой не только для стабилизации размерных параметров, но и для снижения уровня остаточных напряжений. Этот прием применяется в процессах стесненного изгиба, сочетающих осевое поджатие в одних клетях и продольное растяжение в других [258].

1.6.6. Профили с элементами двойной толщины

Профили с элементами двойной толщины условно можно разделить на основании классификации работы [2] и в зависимости от расположения элемента двойной толщины на виды, приведенные на рис. 1.102, причем возможно их дальнейшее разделение в рамках одного вида. Так, при периферийном расположении элемента двойной толщины (рис. 1.102-а) само его положение может быть горизонтальным, наклонным или вертикальным. Различие в топологии этих элементов диктует различные способы формообразования и влечет различные виды дефектов при интенсификации схем их формообразования и обеспечения плотного взаимного прилегания элементов двойной толщины.

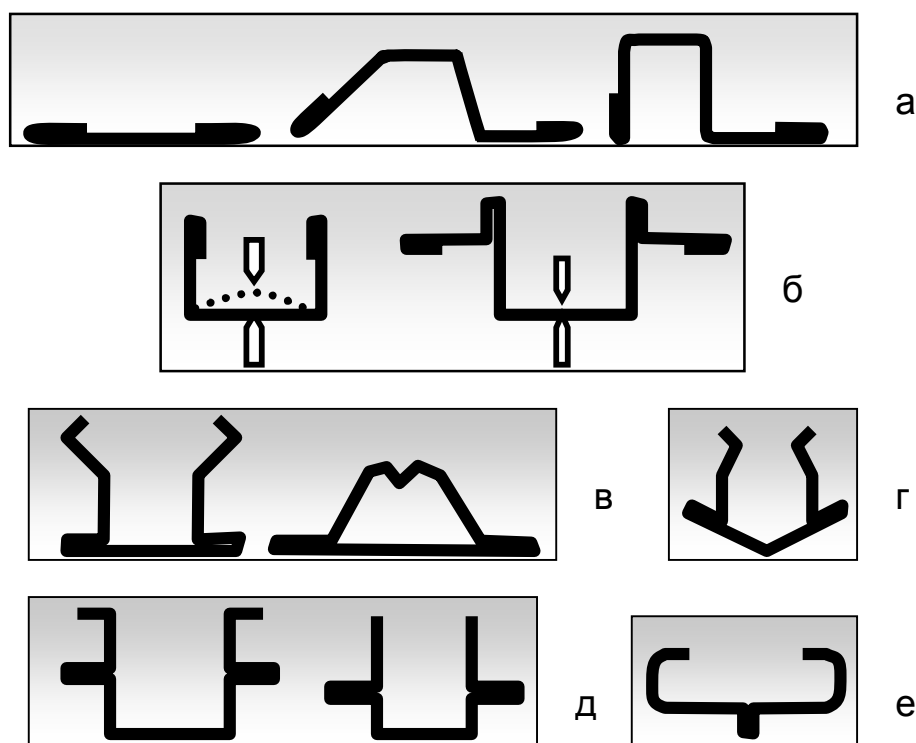


Рис. 1.102. Профили с элементами двойной толщины:

а) – периферийными; б) – угловыми вертикальными; в) – угловыми горизонтальными; г) – угловыми наклонными; д) – на подгибаемых полках; е) – на базовом элементе (дне) профиля

Известен способ изготовления профилей с элементами двойной толщины [259], в котором с целью снижения степени упрочнения в местах изгиба заготовки производят закрытую гибку заготовки до получения полукруглого сечения, свободную гибку, обеспечивающую образование желобчатого сечения, и последующую осадку (рис. 1.103). Предложенный способ целесообразно использовать при толщине заготовки более 3 мм, в то время как для тонких заготовок более целесообразно применение схем интенсивного деформирования. При малых толщинах заготовки упрочнение зон сгиба не столь значительно, зато число переходов может быть уменьшено примерно в два раза. Кроме того, при большой ширине элемента двойной толщины осадка предварительно искривленного элемента может не приводить к полному устранению кривизны вследствие значительного пружинения тонкой заготовки.

В способе [260] с целью предупреждения волнистости кромок, их смятия и нестационарности ширины элемента двойной толщины заготовку изгибают в центральной части, затем выпрямляют ее с одновременной подгибкой периферийных элементов, а на последнем переходе производят осадку крайних участков (рис. 1.104). При этом выпрямление центральной

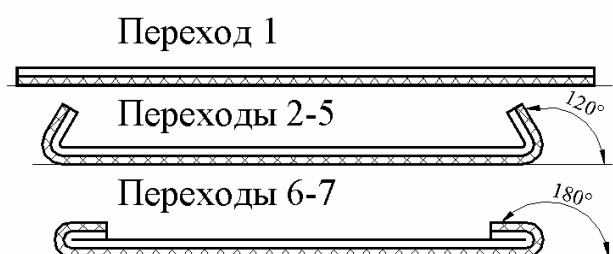


Рис. 1.103. Схема формообразования

части ведут с одновременным ограничением ширины профиля и приложением к крайним участкам со стороны центральной части тангенциальных сил, изгибающих эти участки до полукруглой формы. По предлагаемому способу в интересах судостроения изготавливали специальные профили из металлопластика размером 68х6х1,3 мм с элементами двойной толщины у кромок на стане 0,3–2,5х30–300 со скоростью формовки до 22 м/мин. Полученные профили длиной до 6 м не имели нарушений целостности поверхностных слоев, отличались стабильной шириной надгибаемых элементов по длине, отсутствием смятия кромок. Способ позволяет снизить на 3 – 5 % расход материала по сравнению с известными способами, не допускающими формовку с шириной подгибаемых элементов менее 15 толщин материала. За счет более жесткого режима профилирования удастся снизить на 10 – 20 % число технологических переходов. К ограничениям данного способа следует отнести то, что в четвертом и пятом переходах охватывающим становится верхний ролик, рабочие участки которого имеют встречное движение относительно направления движения профиля, что неизбежно приводит к нарушению покрытия при его расположении на наружной поверхности заготовки. Недостаток способа можно преодолеть за счет введения между клетями торцевой роликовой проводки с эластичным покрытием.

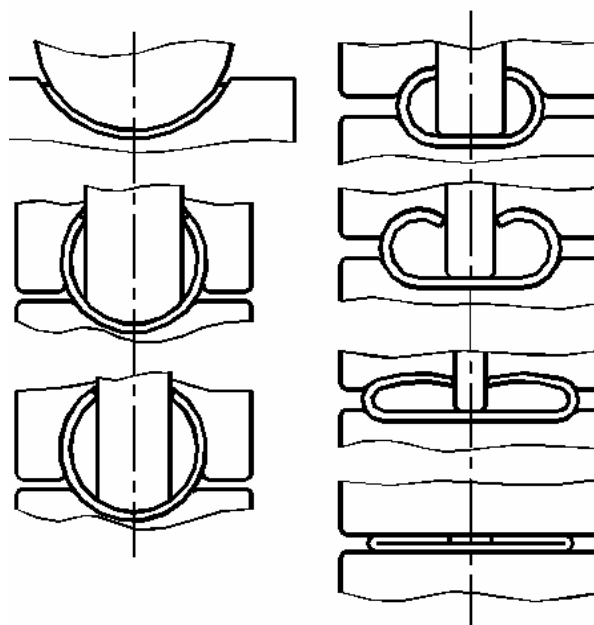
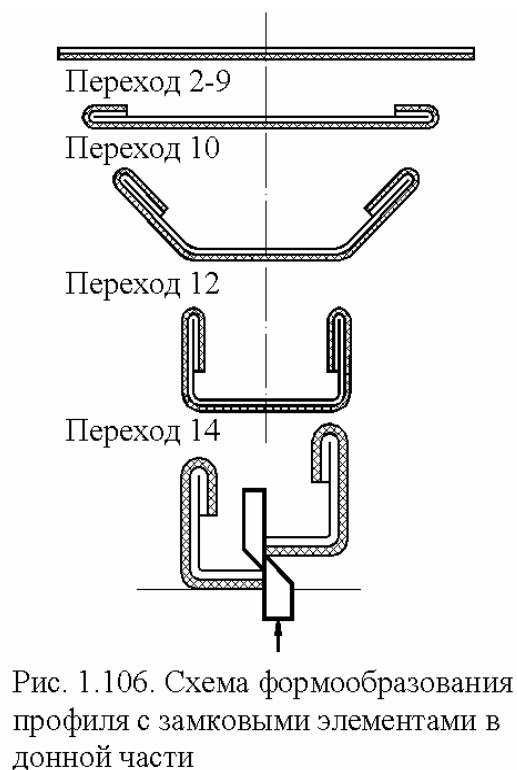
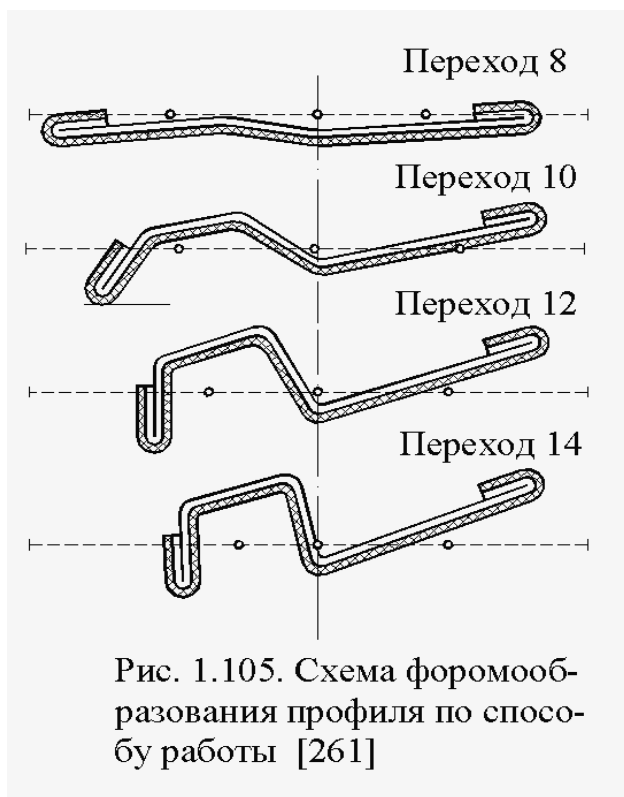


Рис. 1.104. Схема формообразования профиля по способу работы [260]

В другом способе [261] изготовления несимметричных гнутых профилей с элементами двойной толщины на периферийных участках (см. рис. 1.102-а) первоначально формуют элементы двойной толщины, а затем, с целью предупреждения нарушения покрытия, винтообразного скручивания и продольного прогиба профиля, поперечному сечению заготовки придают конфигурацию, у которой центры тяжести масс частей сечений, расположенных по обе стороны от вертикальной оси, проходящей через центр сечения, размещены на одной прямой, лежащей в плоскости профилирования (рис. 1.105). В соответствии с формулой изобретения был изготовлен гнутый профиль из металлопласта ПМ-12 за 14 переходов для нужд черной металлургии. Толщина заготовки – 1,2 мм; ширина – 145 мм. По сравнению с прототипом получено снижение винтообразного скручивания с 1°30' до 0°50', а продольного прогиба – с 1 – 2 мм до 0,8 – 1,0 мм на погонный метр.

Недостатки способа – большое количество переходов в первую очередь обусловленное формовкой элементов двойной толщины при горизонтальном положении заготовки на первых семи переходах (на один переход больше, чем

в ранее рассмотренном способе [260]). С другой стороны, схемы переходов с 8-го по 14-й дают идею об "уравновешивании" локальных жесткостей, хотя в данном случае речь идет лишь об уравновешивании масс сечения. Задача уравновешивания частей сечения профиля по критериям локальных жесткостей далека от тривиальной и требует специального изучения, в первую очередь экспериментального.



Изготовление профилей с вертикальными периферийными элементами двойной толщины (рис. 1.102-б) и одновременной формовкой замковых элементов описано в работе [262]. В процессе формообразования материала заготовки с поливинилхлоридным покрытием подвергается предварительной надрезке на 60 % толщины, а при формовке замковых элементов за счет местной вытяжки и утонения материала до 25 % происходит разделение симметричного профиля на два несимметричных (рис. 1.106). В данном способе формовка элементов двойной толщины осуществляется одновременно с подгибкой полки, что позволяет уменьшить число переходов по сравнению с ранее рассмотренными способами. Этот способ решает задачу повышения производительности и уменьшения скручивания несимметричного профиля. Реализация способа на стане 0,5-2-50-300 со скоростью до 1 м/сек. осуществлялась при изготовлении профиля 26×18×1,3 мм за 10 переходов. Применение способа устраняет технологическую операцию штамповки, а скрутка несимметричного профиля не превышает 1° на 1 м длины. Излом заготовки при окончательном разделении может приводить к бугристости кромки, однако этот дефект может считаться несущественным, если требования распространяются только на размерные параметры по условиям сборки/монтажа конструкции.

Способ изготовления несимметричных профилей из заготовок с покрытием [263] при той же схеме формообразования что и в способе работы [262],

также предусматривает предварительную надрезку, а в двух окончательных переходах за счет последовательного приложения силы реза по обе стороны от линии разделения в противоположных направлениях (рис.1.107) компенсируют винтообразное скручивание, уменьшая его с $3 - 4^\circ$ (в прототипе) до $0^\circ 40' - 1^\circ$ на погонный метр. Профили изготавливают за 14 переходов для судостроительной промышленности.

В данном способе изготовление швеллерного профиля с периферийными элементами двойной толщины завершается к 12-му переходу, в то время по технологии интенсивного деформирования аналогичный профиль может быть изготовлен за шесть переходов. Недостаток способа – завышенное число переходов.

Известен также способ изготовления спаренного профиля из материала с покрытием, несущего два элемента двойной толщины (рис.102-б) и предназначенного для отделки судовых помещений взамен конструкций из ценных пород дерева [264]. Способ включает подгибку заготовки по переходам до получения спаренного профиля за 10 переходов, последующую надрезку и разделение его путем поперечного растяжения за счет вдавливания выступов нижнего ролика в дно профиля и продольного растяжения за счет увеличения диаметров роликов последней клетки на 2 % по отношению к диаметрам роликов предпоследней клетки (рис. 1.108). Способ позволяет уменьшить продольное скручивание с 15° (прототип) до $0,5^\circ$.

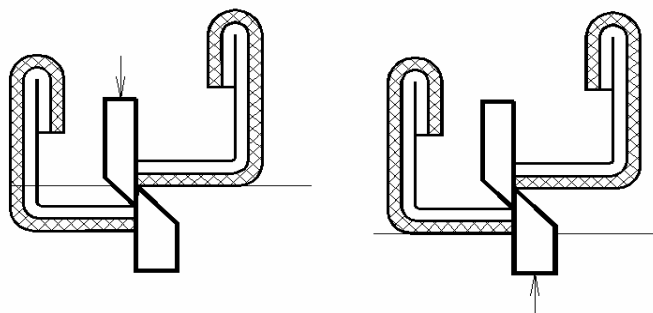


Рис. 1.107. Схемы по способу [263]: а - надрезки профиля; б - разрезки профиля

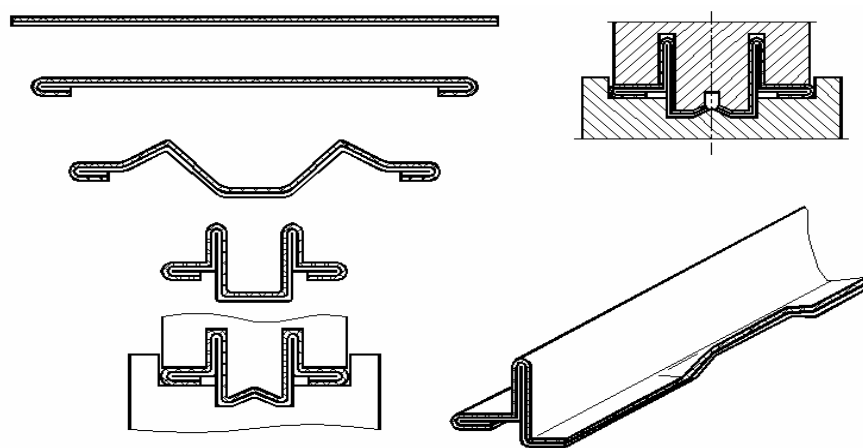


Рис. 1.108. Изготовление профиля со сдвоенным элементом двойной толщины: а) - схема формообразования; б) - положение профиля в последней паре роликов; в) - общий вид профиля

Реализация данного способа требует применения синхронизованных валов клетки, поскольку применяются специальные валки с периодически повторяющимися выступами на нижнем валке и впадинами на верхнем валке, с помощью которых осуществляется формообразование межзамковых элементов за счет местной вытяжки. Осуществление данного способа на станках с приводными только нижними или верхними валками требует сборной валковой арматуры с зубчатыми колесами синхронизации, что резко повышает затраты на технологическую подготовку производства.

Для производства профилей с угловыми горизонтальными элементами двойной толщины с покрытием (рис.1.102-в) на первых переходах подгибают полки до вертикального положения с одновременной формовкой периферийных элементов, а на последних переходах, обжимают полки по наружной поверхности до соприкосновения со стенкой с образованием элементов двойной толщины. При этом сопряженные с ними стенки подгибают до вертикального положения [265]. Цель изобретения – предупреждение продольного прогиба сдвоенных полок и улучшения служебных свойств профиля, работающего в сопряжении с другим профилем. Профиль ПМ-23 с шириной стенки 32 мм и высотой 18 мм, изготовленный по одному способу, имел прогиб сдвоенных полок 0,4-0,6 мм на один погонный метр в то время как в способе прототипа эта величина составляла 1,5 – 2,0 мм на один погонный метр. Кроме того усилие взаимозахвата с профилем, работающим с ним в паре, составляет 367 Н, а в прототипе – 267 Н (на 15 % меньше). Способ позволяет изготавливать профили с отогнутыми вниз или вверх элементами двойной толщины.

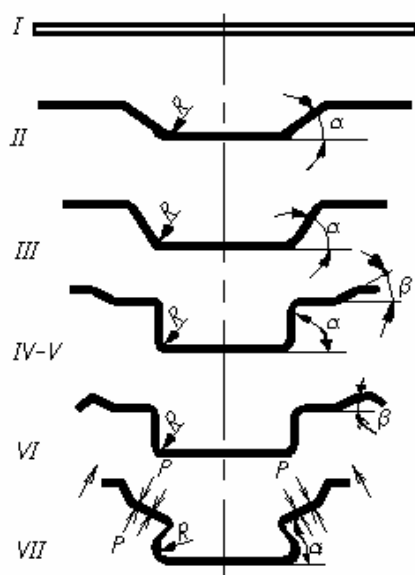


Рис. 1.109. Схема формообразования профиля по способу работы [265]

чения нарушения сплошности покрытия и качественной формовки дугообразных отбортовок концевые участки последних отформовывают последовательно от периферии к центру по дугам с постоян-

Реализация данного способа требует применения специальных межклетьевых или торцевых проводок для подгибки боковых полок (рис.1.109), что является, вероятно, неизбежным для изготовления профиля этой относительно сложной конфигурации.

Сходная схема формообразования [266] применяется в способе изготовления "шляпного" профиля (рис.1.102-в), в котором с целью исклю-

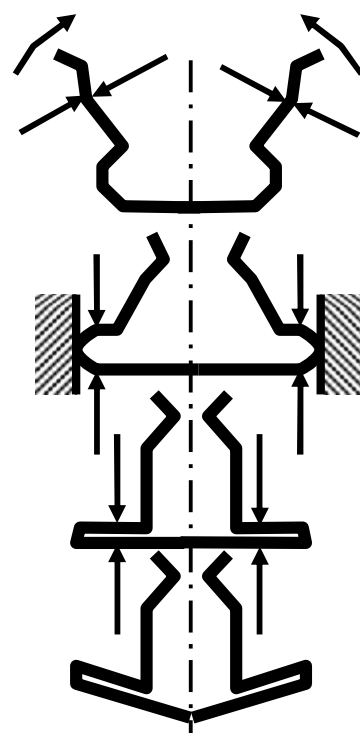


Рис. 1.110. Схема формообразования профиля по способу [267]

ными радиусами. Затем, после догибки элементов осуществляют обжатие полок. Способ реализуется за 16 технологических переходов при изготовлении профиля ПМ – 30 ЭОЦ с шириной 41 мм и высотой 29,5 мм из полосовой заготовки шириной 135 мм и толщиной 0,55. Радиусы дугообразных заготовок на стойках профиля составляли 4,8 – 5,0 мм.

В данном способе число переходов явно завышено. Например, переходы с первого на восьмой при применении интенсивного формообразования могут быть сведены только к четырем переходам вследствие одновременной формовки средней части профиля и периферийных участков. К тому же описанный способ требует применения межклетевых проводок на 6, 7 и 14-м переходах.

Способ изготовления полузамкнутого профиля (рис.1.102-г) направлен на исключение нарушения сплошности покрытия и уменьшение количества технологических переходов [267]. Его отличительной особенностью является то, что места изгиба элементов полок двойной толщины сначала отформовывают по дугам больших (по сравнению с заданными) радиусов, а в последующих переходах эти радиусы постепенно уменьшают, после отформовки V – образных отгибов у кромок обжимают нормальными усилиями стенки профиля, а подгибку их до вертикального положения осуществляют после обжима, при этом осадку полок осуществляют вертикальными усилиями с ограничениями ширины профиля (рис. 1.110). Способ реализуется за 11 переходов при изготовлении профиля ПИ – 23 с шириной стенки 34 мм и высотой профиля 22 мм.

Данный способ обладает тем преимуществом по отношению к прототипу, что уменьшается на 35% количество механической оснастки при общем снижении ее веса на 14%, а в сравнении со способом [265] не предусматривает применения промежуточных клетей с вертикальными роликами. Однако и в этом случае первые семь переходов могли бы быть заменены четырьмя – пятью переходами, выполненными по схемам интенсивного деформирования.

Близким по сути к способам производства профилей с элементами двойной толщины на подгибаемых полках (рис.1.110-д), является способ [268], в котором, с целью улучшения плоскостности меньших участков боковых стенок при размещении элемента двойной толщины (или гофра), при подгибке боковых стенок воздействуют усилием на одну из стенок гофра, расположенного со стороны меньшего участка боковой стенки. Элемент двойной толщины (или гофр) должен быть сформирован на предварительных переходах, до начала подгибки полок.

Более интенсивным в технологическом отношении является способ [269], в котором с целью экономии металла и повышения размерной точности профилей с покрытием, содержащих боковые стенки с полками наружу и элементами двойной толщины, имеющими зазор между их ветвями, превышающий две толщины металла заготовки, формовку продольных технологических гофров осуществляют в местах будущих элементов двойной толщины на заданную высоту, обрезку кромок производят при этой же высоте

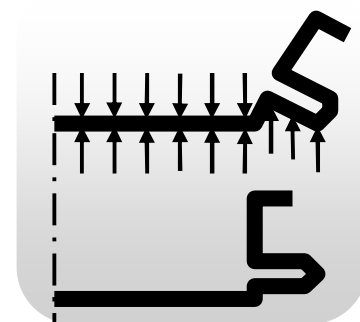


Рис. 1.111. Схема формовки профиля по способу [269]

упомянутых гофров, а затем осуществляют доформовку продольных гофров в элементы двойной толщины и подгибку полок и боковых стенок с отформованными элементами двойной толщины (рис.1.111). Способ реализован на профилегибочном агрегате $0,5 \cdots 2,5 \times 300 \cdots 1500$ при изготовлении профилей с поперечными гофрами на стенке и элементами двойной толщины на подгибаемых полках из заготовок толщиной 0,7 мм. Отклонения ширины полок готового профиля составляли $+0,5 - 0,8$ мм (по способу прототипа $\pm 1,2$ мм) при потере металла 0,18 % (против 5,5 % при изготовлении профиля по способу прототипа). Ширина заготовки составляла 1085 мм, что относит данный способ скорее к способу производства гофрированных панелей со специфической формовкой периферийных элементов.

Для производства профилей с элементами двойной толщины в данной части профиля (рис.1.102-е) существует способ [270], в котором, с целью предотвращения утонения материала в местах изгиба, ширину изгибаемых участков профиля в предыдущих проходах выдерживают большей ширины их развертки в последующих проходах и на готовом профиле (рис.1.112). По данному способу изготавливается С – образный профиль $120 \times 20 \times 10 \times 2$ мм из Ст3 с высотой выступа элемента двойной толщины 15 мм, причем ширина участка заготовки под элемент двойной толщины принималась равной 40 мм с последующим уменьшением до 28 мм за 10 технологических переходов. По сути дела, данная схема весьма близка к стесненному изгибу и приложима лишь к участкам, где возможна осадка соответствующего участка заготовки со значительной кривизной. Для участков умеренной кривизны предотвращение утонения или набор толщины возможны лишь в условиях упругого обжима прилегающих участков заготовки, что целесообразно лишь в случае жестких требований к изготавливаемому профилю.

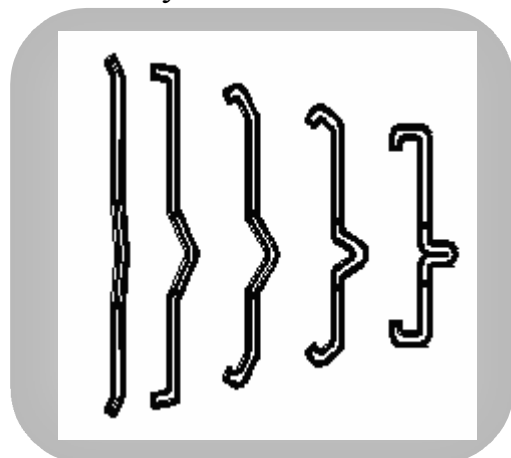


Рис. 1.112. Схема формообразования профиля с элементом двойной толщины в донной части

Из обзора способов изготовления профилей с элементами двойной толщины видно, что цели, преследуемые применением того или иного способа весьма разнообразны: предотвращение скрутки, прогибов, обеспечение плоскостности и ряда других, однако в настоящее время наиболее актуальными задачами остаются уменьшение числа переходов и предотвращение потери устойчивости периферийных элементов и повреждения покрытия заготовки. Последняя задача обусловлена появлением в последние годы разнообразных листовых и рулонных материалов с хорошими технологическими свойствами покрытия. С другой стороны, быстрое расширение номенклатуры профилей приводит к частой смене объектов производства, а потому для рентабельности профилегибочного производства необходимо применять малопереходные процессы профилирования (стесненный изгиб или интенсивное деформирование).

1.7. Теоретический анализ процессов профилирования

Теоретическая разработка процессов профилирования базируется на ряде фундаментальных работ отечественных и зарубежных исследователей И.П. Ренне [271], Р. Хилла [272], Е.А. Попова [273, 274], В.И. Давыдова [275], А.С. Вольмира [276], Г.Я. Гуна [277], В.В. Соколовского [278], Ю.Н. Работнова [279], К.Н. Богоявленского [21], В.В. Колмогорова [280], Ю.М. Арышенского [138, 281], В.И. Ершова [121], А.Д. Матвеева [98, 282], М.Е. Докторова и И.С. Тришевского [201], Г.В. Проскурякова [39, 40], С.И. Вдовина [99, 100], И.М. Колганова [27, 258], Х. Судзуки и М. Киути [283], Д. Кокадо и Е. Онода [284].

В процессах стесненного изгиба и интенсивного деформирования в теоретическом аспекте возникает ряд новых проблем:

1. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) в угловой зоне в связи с приложением торцевого усилия к заготовке. Вместо утонения, характерного для обычной гибки или традиционного профилирования, угловая зона получает утолщение; имеют место деформации сдвига;
2. Угол пружинения для ряда условий становится отрицательным;
3. Понятие предельного радиуса гибки при стесненном изгибе скорее ассоциируется с нарушением сплошности материала на внутреннем контуре, чем на наружном;
4. Изменяется расклад силовых параметров; появляется проблема сохранности покрытия заготовки;
5. Модели традиционного профилирования определения протяженности зон деформирования в межклетьевом пространстве становятся неприемлемыми;
6. В связи с интенсификацией процесса резче проявляются приобретенные дефекты заготовки и профиля, имеет место потеря устойчивости элементов профиля. При этом возникают проблемы оптимизации схем формообразования и углов подгибки элементов, разработки новых способов изготовления профилей и соответствующих устройств;
7. Подлежит определению количество технологических переходов и пр.

1.7.1. Исследование НДС угловой зоны

В некоторых процессах профилирования полосы в роликах, где можно принять схему напряженно-деформированного состояния близкой к схеме плоской деформации (традиционное профилирование, некоторые схемы интенсивного деформирования), параметры НДС в угловой зоне можно рассматривать с позиций чистого изгиба, которому посвящено значительное количество работ [271 – 275, 277, 279, 280, 282].

В классической постановке задача гибки в условиях плоского напряженного состояния с учетом упругих составляющих рассматривается как изгиб прямоугольных пластин за пределами упругости на основе метода упругих решений в сочетании с вариационным методом [285]. Нагружение считают квазипростым без учета влияния поперечных сил. Вариационное уравнение равновесия включает искомую функцию прогибов, которая аппроксимируется рядом Фурье, а также функцию пластичности.

Интегрирование по поверхности выполняется численным методом Гаусса или Чебышева. Применение вариационного метода позволяет определить перемещения. Данный подход, хотя и обладает определенной универсальностью в части учета задания граничных условий, однако на практике оказывается весьма трудоемким.

Существуют подходы, в которых анализируется чистый изгиб в условиях плоской деформации без учета утонения заготовки в процессе деформирования [282, 271, 272, 286, 287]. Приложение теории гибки к процессу профилирования дается в работах [201, 288], однако в них рассматриваются лишь простейшие случаи традиционного профилирования.

1.7.1.1. Учет изменения толщины заготовки

Из рассмотрения движения материального слоя радиуса R_v , делящего объем изогнутой части заготовки на зоны сжатия и растяжения, следует соотношение [272]:

$$\frac{R_v^2 - r_B^2}{R_H^2 - r_B^2} = \frac{R_0 - r_B}{R_H - r_B} = \text{const},$$

где R_0 – радиус нейтрального слоя деформаций.

Это соотношение для случая гибки с растяжением или со сжатием приводит к заключению, что в зоне сопряжения изогнутого участка и полки расположение слоев противоречит гипотезе плоских сечений, принимаемой при обычной гибке. Экспериментальное определение границ пластической области и положение слоев материала для тонких заготовок затруднено в связи с малыми размерами зоны сгиба. Тем не менее, некоторые приближенные результаты по определению деформаций были получены А.В. Скрипачевым [89] методом делительных сеток при исследовании спаянных образцов, гнутых в кромкогибочной машине. Размеры и характеристики пластической зоны оказывают существенное влияние на параметры пружинения, хотя при профилировании пластическая зона простирается далеко за пределы криволинейного участка.

Наличие тангенциального (торцового) сжимающего усилия при стесненном изгибе увеличивает кривизну листа в зоне сгиба по сравнению с чистым изгибом и приводит к последовательному расширению пластической зоны от биссектрисы угла к прямолинейным участкам с набором утолщения.

В статье [289] для решения задачи стесненного изгиба задаются скорости смещения частиц в радиальном направлении без формулировки гипотезы плоских сечений в явном виде. Материал принимается изотропным и идеально пластичным. С использованием ассоциированного закона пластического течения получено распределение напряжений, совпадающее с известными результатами [272, 290]. Следует отметить в ретроспективном плане, что цилиндрический изгиб с упрощенным условием пластичности для плоского состояния был рассмотрен в статье [291], где показано, что изменение толщины заготовки не зависит от пластических свойств материала, а определяется уравнениями движения. В более ранних работах [272, 290] отмечалось, что при

цилиндрическом изгибе идеально пластичного листа изменения толщины не происходит. Однако, как оказалось впоследствии [286], исходные выражения в подходе Хилла [272] и Закса [290] существенно различаются, причем в последнем случае они оказались ошибочными, поскольку не принималось во внимание движение материала в окружном направлении.

К отсутствию зависимости утолщения и напряжений приводит решение задачи стесненного изгиба широкой упрочняющейся изотропной полосы, основанное на прямом интегрировании уравнений равновесия [292].

Попытка определения кинематики формоизменения на основе гипотезы ортогональных линий предпринята в работе [293]. Суть гипотезы заключается в том, что продольные волокна образуют семейство дуг окружностей, центры которых лежат на биссектрисе угла изгиба, при этом напряжения в каждой из точек зоны сгиба зависят от двух координат, в отличие от гипотезы плоских сечений. Основные параметры определяются лишь вблизи биссектрисы угла, где влиянием касательных напряжений можно пренебречь, что лишает решение содержательного выхода. Обусловлено это трудностью вычислительных процедур.

Наиболее реалистично отражает картину формоизменения решение задачи стесненного изгиба в штампе [106], полученное на основе принципа минимума работы и метода Ритца, где авторы отходят от гипотезы плоских сечений ввиду действия при стесненном изгибе касательных напряжений (рис. 1.113). Торцовое поджатие определяется методом баланса работ, а процесс деформирования рассматривается как аддитивная последовательность приращения деформации сдвига с последующей минимизацией квадратичного функционала. Затем интегрированием находится величина утолщения ΔS в зоне сгиба:

$$DS = e \cdot (R - r_0) \cdot \left(1 + u \cdot \frac{r_0}{R} \right) \cdot \cos \left(\frac{p \cdot j}{2 \cdot a} \right), \quad e = \frac{p \cdot Dh}{2 \cdot a \cdot (R + r_0)},$$

$$u = 2 \cdot \frac{\ln(R/r_0) \cdot (p^2 - (4 \cdot a)^2)}{(1 - r_0^2/R^2) \cdot (p^2 + (4 \cdot a)^2)},$$

где R , r_0 – начальные наружный и внутренний радиусы соответственно; ε – относительная осадка; Δh – величина осадки прямолинейного участка; 2α – уголгиба; φ – текущий угол.

Однако условие закрепления концов заготовки оказывается не вполне пригодным для процесса профилирования, поскольку в роликах величина

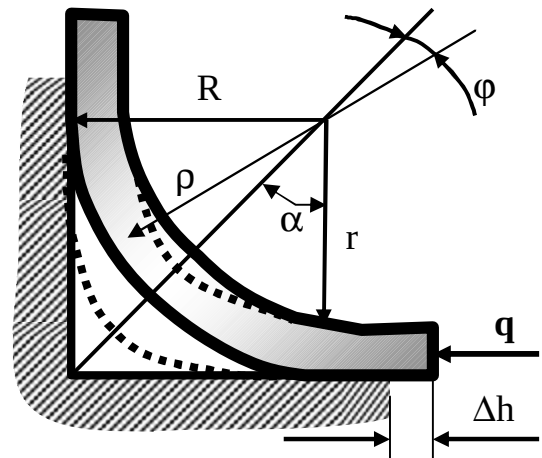


Рис. 1.113. Изгиб полосы в штампе с торцовым поджатием

осадки Δh значительно превосходит приведенную авторами ту же величину, найденную путем деления разности площадей сечения при стесненном изгибе и обычной гибке на толщину исходного листа.

Аналогичная задача решалась и методом возмущений [89], в которой в качестве нулевого приближения брали решение задачи чистого изгиба, а возмущенную систему линеаризировали по величине утолщения с помощью метода Крылова - Боголюбова - Митропольского в растянутых координатах Лайтхилла. Данный подход является весьма перспективным в том отношении, что он позволяет выявлять тонкие эффекты, например, особенности в распределении интенсивности деформаций. К недостаткам данного подхода следует отнести некоторую неоправданность применения указанной линеаризации [294] в отсутствие осцилляций параметров НДС во времени, как это имеет место с параметрами процесса при нелинейных колебаниях. К тому же, решение является весьма громоздким, а изменение граничных условий или схемы нагружения (введение, например, аксиального или радиального усилия) катастрофически усложняет процедуру вычислений даже первого приближения.

1.7.1.2. Учет влияния упрочнения при гибке

При гибке листовых материалов упрочнение материалов оказывает существенное влияние на технологический процесс и его предельные возможности [273]. В ранее рассмотренной работе [285] изучались пластины из материала с линейным упрочнением, упрочнением в виде степенной кривой, диаграммой напряжений – деформаций в виде произвольной кривой. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными по гибке в штампах [295], но расходятся с данными из практики профилирования с применением схем, интенсифицирующих данный процесс.

Различные гипотезы упрочнения рассматриваются в монографиях Л.М. Качанова [296, 297]. Обсуждается выбор инвариантов для формулировки условия пластичности упрочняющегося деформируемого тела, показано влияние упрочнения на предельные возможности процесса деформирования. Однако, возможность получения замкнутых решений при учете упрочнения ограничивается лишь случаем круговой пластинки, находящейся под действием осесимметрично распределенной нагрузки. К примеру, в монографии [297] показано, что при изгибе пластины из материала, обладающего степенным законом упрочнения, прогибы и изгибающие моменты возрастают по мере уменьшения упругой зоны, а полученное из условия сохранения момента нелинейное дифференциальное уравнение не допускает аналитического решения.

В работах [287, 298] рассмотрена гибка с учетом упрочнения как по деформационной теории, так и по теории течения. Отмечается, что в отличие от гибки неупрочняющегося материала при наличии упрочнения имеет место изменение толщины материала в зоне сгиба. Хотя по данным К.Н. Богоявленского [288] при гибке неупрочняющегося материала небольшое утонение (1-1,5 %) все же имеет место.

В работе Эльдомейти и Шабейка [299] рассмотрена задача об изгибе нелинейно - упрочняющегося листа с приложением аксиального растягивающего усилия. Анализируются три режима: полное пластическое состояние, первичное пластическое состояние и вторичное пластическое состояние, границы которых определяются величиной соотношения результирующей деформации от деформации, соответствующей появлению пластической зоны, и деформаций, при которых начинается разрушение материала. Рассматривается также положение нейтрального слоя в зависимости от соотношения величин изгибающего момента и аксиального усилия для материала со степенным законом упрочнения ($n=0,3$) и условие выхода нейтрального слоя за пределы внутренней поверхности. Данная задача имеет весьма важное приложение к процессам профилирования, поскольку аксиальное растяжение часто применяется для предотвращения кромковой волнистости.

В работе [288] показано, что при совместном действии тангенциального растяжения σ_t и изгиба с учетом степенного упрочнения относительное утонение полосы быстро растет и уже при $\sigma_t = 0,15...0,25\sigma_s$ достигает значений такого же порядка, как и наблюдаемых в практике профилирования значений (15-18 %). На основе полного факторного эксперимента 2^3 определены утонение и усилие деформирования при профилировании. Такое сочетание силовых параметров характерно для производства профилей с рифтами, получаемыми локальной вытяжкой в поперечном направлении [207, 209].

В работах по стесненному изгибу [27, 124, 281] упрочнение также учитывается при теоретическом исследовании, однако в качестве аргумента в законе упрочнения берется не интенсивность деформаций сдвига, а одна из главных деформаций. К сожалению, не представляется возможным по результатам работ установить погрешность, должную этой замене, ввиду отсутствия базы для сравнения моделей.

Из рассмотренных работ следует, что упрочнение существенно влияет на силовые параметры формирования уголкового профиля, пружинение и параметры предельного формоизменения, в связи с чем эффект упрочнения надлежит принимать во внимание при разработке технологии. Сказанное особенно актуально для технологии изготовления профилей из листовых авиационных сплавов, поскольку некоторые из них (сплавы 01420, В95) весьма склонны к упрочнению при пластической деформации. При расчетах параметров НДС подгибаемых плоских элементов профиля упрочнением можно пренебречь, ибо их деформации обычно незначительны для создания ощутимого эффекта упрочнения.

1.7.1.3. Анизотропные свойства сплавов и их учет при гибке

Исходный листовой материал для профилирования, полученный прокаткой, имеет ярко выраженные анизотропные свойства [300, 97, 301, 124, 138, 281], проявляющиеся в направленности механических и физических свойств материалов и описываемые с помощью материальных тензоров соответствующих рангов. Идентификаторы (показатели), используемые для оценки анизотропии различными авторами, весьма разнообразны и по-разному отражают

суть данного явления. Например, в книге [302] были использованы следующие показатели:

$$A_d = 2 \frac{(d'' - d')}{(d'' + d')}; \quad A_{s_B} = 2 \frac{(s'_B - s''_B)}{(s'_B + s''_B)},$$

где A_δ , A_{σ_B} - показатели анизотропии относительного удлинения и временного сопротивления разрыву соответственно, δ'' , σ''_B , δ' , σ'_B - свойства материала вдоль и поперек прокатки соответственно.

Однако такая структура показателей не вполне ясно отражает реальную картину и не является удобной для выполнения расчетов.

Существуют дифференциальные показатели анизотропии, представляющие собой отношение деформаций по ширине и толщине образца:

- коэффициент Крупковского и Кавинского [302]

$$k_a = A_n / A_B,$$

где A_n , A_B - показатели изменения толщины и ширины образца соответственно;

- коэффициент Лэнкфорца [303]

$$R = \frac{\ln(w_0/w_R)}{\ln(t_0/t_R)},$$

где W_0, t_0, W_R, t_R - начальные и конечные значения ширины и толщины материала соответственно;

- коэффициент анизотропии [304]

$$r = de_2 / de_3,$$

где ε_2 , ε_3 - деформация по ширине и толщине образца соответственно.

Наибольшее распространение получили коэффициенты поперечной деформации $\mu_{i,j}$ [300, 138, 281], выведенные на основе соотношений Хилла [272] и представляющие собой отношение деформаций по ширине (толщине) образца и деформации вдоль действия силы:

$$m_{i,j} = -e_i / e_j,$$

где e_i , e_j - соответствующие логарифмические деформации.

Последний показатель является наиболее предпочтительным по сравнению с приведенными выше ввиду его матричной формы и свойства согласования с коэффициентами Пуассона в упруго-пластической области. Достоинством коэффициентов поперечной деформации является также то, что они позволяют сравнительно просто представить структуру материальных тензоров теории пластичности в случае ортотропного тела.

Учет анизотропии в технологических расчетах отражен в работах многих авторов [97, 124, 131, 138, 281, 300 - 304]. В частности, при стесненном изгибе силовые факторы формирования угла зависят от свойств материала [89]:

$$N_0 = \frac{BS_0 s_s}{\sqrt{1 - m_{12}m_{21}}}; \quad M_0 = \frac{BS_0^2 s_s}{\sqrt{1 - m_{12}m_{21}}};$$

где N_0 – сжимающее усилие, приложенное к торцам заготовки, M_0 – изгибающий момент.

Обстоятельный обзор учета анизотропии в приложении к стесненному изгибу дан в работе [33]. Фактор анизотропии подлежит учету при технологических расчетах процессов профилирования, однако в отличие от операций листовой штамповки здесь раскрой материала однозначно определен, а желаемый вид анизотропии может быть сформирован лишь при производстве листового проката [138].

1.7.1.4. Деформируемость и предельные возможности при гибке

При обычной гибке основным геометрическим параметром, определяющим предельные возможности процесса, является относительная величина внутреннего радиуса, минимальное значение которого лимитируется допустимой деформацией наружного растянутого волокна [273, 132, 305]. В работе [306] предлагается следующая формула, полученная на основе вычисления критических степеней деформации с учетом вида напряженного состояния:

$$\frac{r_{min}}{S_0} = \frac{1 - 0.5(1 - y_M)^{-0.47}}{(1 - y_M)^{-0.47} - 1},$$

где ψ_M – характерный размер шейки образца при испытании на растяжение.

Несколько иной вид выражения для предельного радиусагиба с учетом утонения дается в статье [307]:

$$\frac{r_{min}}{S_0} = \frac{0.5h^2 - h\sqrt{1 - y_D}}{\sqrt{1 - y_D} - h},$$

где η – коэффициент утонения, ψ_D – поперечное сужение образца при растяжении.

Деформационные свойства материала (относительное удлинение или сужение шейки образца) оказывают решающее влияние на предельные возможности гибки с торцовым сжатием. Хотя методам оценки деформируемости материалов посвящено значительное количество работ [98, 131, 280, 295, 297, 306, 308 – 310], однако применение их для сложных видов нагружения весьма затруднено. Так, в работе [280] вводится функция запаса пластичности ψ :

$$\psi = \frac{\int_0^{t_p} H dt}{l_p},$$

где $\int_0^{t_p} H dt$ – величина накопленной деформации сдвига, l_p – функция предельной пластичности для данного материала.

Смысл функции использования запаса пластичности состоит в том, что в момент времени t_p пластическое разрыхление достигает критического значения, после чего происходит образование трещины гриффитского размера и насту-

пает стадия катастрофического разрушения. При этом $\psi = 1$. Данный критерий использовать на практике затруднительно, поскольку не существует универсальных способов определения показателя немонотонности процесса входящего в λ_p , к тому же данный показатель не учитывает анизотропные свойства материала.

Экспериментальные значения допустимых радиусов гибки для широкого класса металлов и сплавов приводятся в справочниках [98, 295] и книге [138].

При стесненном изгибе, в отличие от обычной гибки, предельные возможности определяются более сложным образом и зависят от величины внутреннего радиуса и утолщения [89, 124, 281]. В зависимости от геометрии зоны сгиба разрушение может происходить или на наружном контуре, или же на внутреннем. В первом случае характер разрушения может быть теоретически оценен с помощью существующих критериев разрушения [280, 308, 309, 310]. Во втором случае разрушение может происходить путем гофрообразования на внутреннем контуре зоны сгиба с последующим складкообразованием [311]. Сочетание допустимых радиуса и утолщения может зависеть не только от величины деформации и вида напряженного состояния, но и от свойств материала, а также состояния поверхности листа и качества его структуры. В работе [281] показано, что для листов с относительным сужением $\psi = 0,3$ и значениях коэффициентов анизотропии около 0,8 допустимый относительный радиус гiba составляет 4,1, в то время как при коэффициентах анизотропии порядка 0,3 и том же относительном сужении – 1,2.

1.7.1.5. Пружинение при гибке

Пружинение при обычной гибке достаточно хорошо изучено [98, 107, 273 – 275, 295, 280, 304, 312]. В книге [281] приводятся данные по пружинению для некоторых тонколистовых материалов с учетом анизотропии и упрочнения (рис. 1.114) при гибке моментом.

Экспериментальное исследование пружинения при штамповке эластичной средой методом стесненного изгиба рассмотрено в статье [108]. Экспериментальные данные по пружинению при гибке в кромкогибочном устройстве представлены в диссертации [89].

Для процесса интенсивного формообразования профилей в роликах вопрос пружинения для типовых профилей решен в работе [313]. Несколько ранее автором настоящей работы также проведены исследования пружинения для специфических схем стесненного изгиба (см. раздел 3).

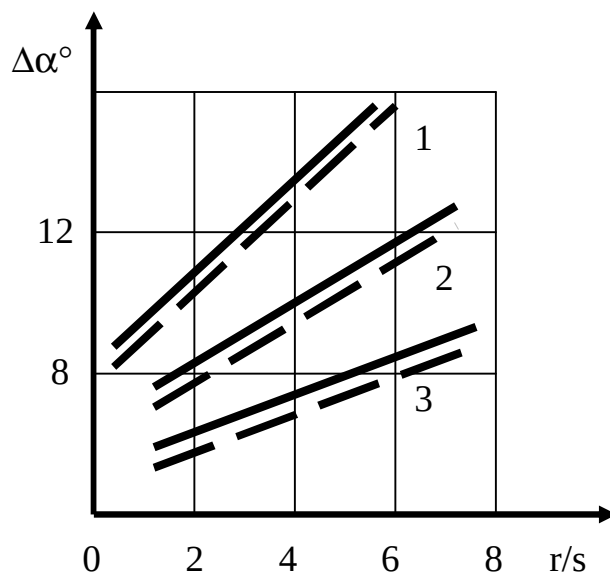


Рис. 1.114. Зависимость угла пружинения от показателей анизотропии: 1 – ВТ1-2; 2 – АМГ-6М; 3 – Д16АМ;
 ————— — изотропный;
 - - - - - — анизотропный

1.7.2. Поведение заготовки в межклетьевом пространстве

При интенсивном формообразовании профилей в роликах, как, впрочем, и при традиционном профилировании большое значение для обеспечения устойчивости процесса и надлежащего качества профиля имеет характер поведения последнего в межклетьевом пространстве профилегибочного станка. Существует большое количество факторов, влияющих на данный процесс, однако общим для всех процессов является разделение участка заготовки между соседними парами роликов на зоны стабилизации, плавного перехода и контактную зону [81]. Одной из важных характеристик процесса является протяженность зоны плавного перехода, влияющая на величину продольных деформаций подгибаемых полок и, как следствие, на возможность возникновения потери устойчивости заготовки в межклетьевом пространстве. Кроме того, если межклетьевое расстояние меньше, чем протяженность зоны плавного перехода, то происходит переформовка заготовки, повышающая энергетические затраты, а также ухудшающая условия формообразования [314].

Поэтому определение протяженности зоны плавного перехода важно не только для разработки технологии, но и для проектирования профилегибочного оборудования [314, 315].

В ранних работах по профилированию при расчете деформаций подгибаемой полки полагали, что размер зоны плавного перехода совпадает с межклетьевым расстоянием [275]. Однако при углах подгибки более 10° данное предположение вносит существенную погрешность в расчеты.

В более поздней работе по изготовлению профилей из титановых сплавов указывается, что длина зоны плавного перехода, будучи зависимой от протяженности зоны стабилизации (так называемого «жесткого конца»), меньше, чем межклетьевое расстояние [21].

В работах украинских авторов [201, 316] размер зон плавного перехода, который определялся экспериментально для различных видов профилей и рабочих режимов формообразования, неизменно был меньше межклетьевого рас-

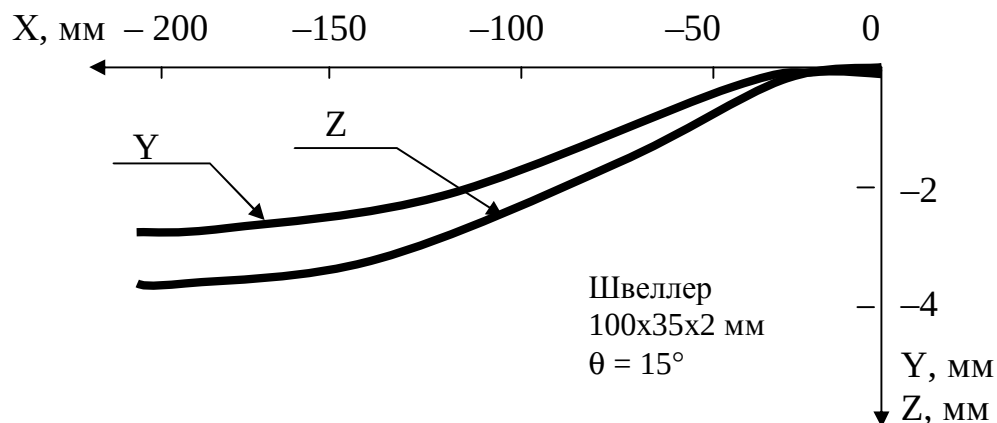


Рис. 1.115. Положение кромки при профилировании

стояния. Установлено также, что очаг пластической деформации простирается за осевую плоскость валков на небольшое расстояние (порядка $1/3$ от среднего

диаметра формирующих роликов). Указано, что поперечный изгиб полки увеличивает протяженность зоны плавного перехода.

В работе [317] представлены данные экспериментов по определению протяженности зоны плавного перехода (рис. 1.115), осуществленных на десяти-клетьевом консольном стане при варьировании факторов, сведенных в табл. 1.18. Проведенные эксперименты с точностью $\pm 6\%$ показали, что деформация полки и протяженность зоны плавного перехода зависят от угла подгибки, ширины полки и толщины материала и практически не зависят от механических свойств материала.

Исследование охватывало только номенклатуру швеллеров с полками, не превышающими 35 толщин материала. Также не было учтено влияние радиусов зон сгиба, которое при некоторых условиях может оказываться значительным.

Таблица 1.18.

Условия и варьируемые факторы эксперимента в работе [317]

Условия и варьируемые факторы	Значение
1. Материал	Мягкая сталь, алюминий толщиной 0,6 мм
2. Ширина профиля	20 мм
3. Ширина полки	10 мм; 15 мм; 20 мм
4. Угол подгибки за переход	20, 25, 30, 35, 40, 45 градусов
5. Скорость профилирования	2,55 м/мин

В публикации [318] по экспериментальным данным формообразования

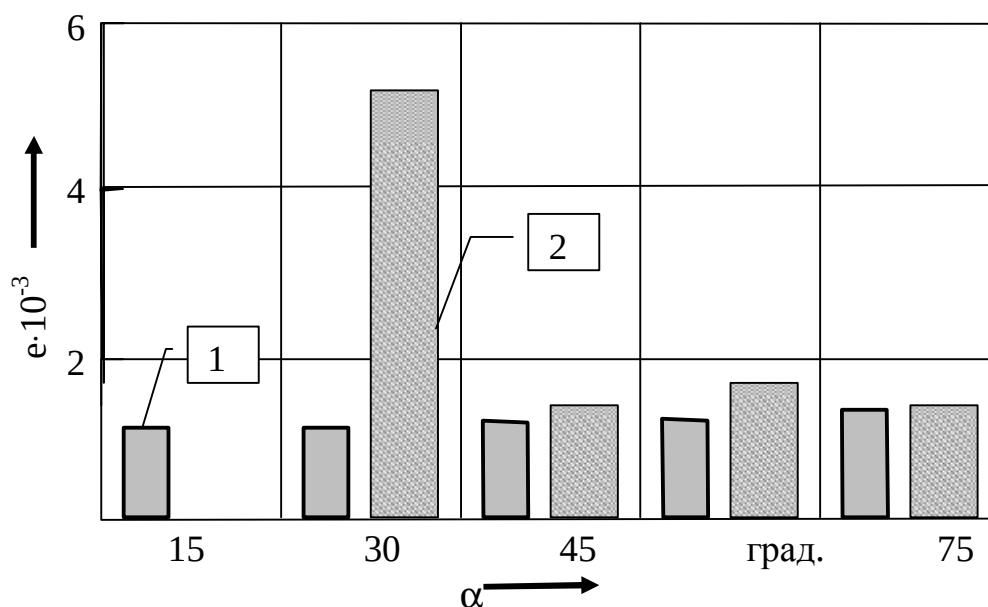


Рис. 1.116. Зависимость продольной логарифмической деформации полки от режимов ее подгибки: 1 – со всеми переходами; 2 – без первого перехода

швеллерного профиля 100х35х2 мм с помощью кривых Безье описана конфигурация зоны плавного перехода полки, подгибаемой по режимам: 15° – 30° – 45° – 60° – 75° (рис. 1.53) и 30° – 45° – 60° – 75°. Отметим, что при режиме подгиб-

ки в 15° продольная логарифмическая деформация не превышает 0,18 %, а при увеличении угла подгибки до 30° на первом переходе та же деформация достигает 0,54 % (рис.1.116). Приведенные данные не охватывают диапазон изменения толщин и ширин полок, а потому носят весьма частный характер.

В работе [319] при расчете распределения давлений металла на валки в промежуточной клетки определяется длина очага деформации, состоящая из протяженности двух «улиток» l_1 и l_2 (зоны полки с разноименной кривизной). Суммарная длина зоны деформации $L = l_1 + l_2$ представлена следующей зависимостью:

$$L = [b^4 - (\pi r_1 \alpha \cdot 180^{-1})^4]^{0,25} + 0,134 \alpha^{0,4} b^{1,4} s^{-0,4},$$

где r_1 – средний радиус места изгиба профиля в валках.

Данная полуэмпирическая зависимость может использоваться для оценки длины зоны плавного перехода при традиционном профилировании.

Определение протяженности зоны плавного перехода вариационным методом при формообразовании уголкового профиля из материала, упрочняющегося по степенному закону, рассмотрено в работе [277]. Протяженность зоны плавного перехода L_g дается формулой:

$$L_g = 2 \cdot b \cdot (m+1) \cdot \left[\frac{m+2}{2 \cdot m+3} \cdot \frac{b}{s_0} \cdot \left(\frac{r}{s_0} \right)^m \right]^{\frac{1}{2 \cdot m+2}} \cdot \left(\frac{Dj}{2 \cdot m+1} \right)^{\frac{2 \cdot m+1}{2 \cdot m+2}},$$

где b – ширина подгибаемой полки, мм; m – показатель упрочнения; s_0 – толщина заготовки, мм; $\Delta\varphi$ – угол подгибки, град.

В разделе 3 две последние зависимости представлены графически для сравнения с другими подходами определения длины зоны плавного перехода.

1.7.3. Углы подгибки и деформации полок

В традиционном профилировании и методе интенсивного деформирования углы подгибки задаются явным образом, а при стесненном изгибе углы подгибки являются отчасти условными и определяются по наклону прямолинейного участка полки по отношению к горизонтали или иной реперной линии.

В классической работе [275] по профилированию в валках предельный угол $\alpha_{пр}$ подгибки за переход определяется формулой:

$$\alpha_{пр} \leq \arcsin \frac{L}{b} \sqrt{e_{дон} \cdot \frac{e_{дон} + 2}{2}},$$

где L – межклетьеовое расстояние; b – ширина полки; $e_{дон}$ – допустимая деформации кромки.

Данная формула получена на основе допущения о прямолинейности кромки, что не соответствует действительному характеру процесса формообразования, поскольку кромки полосы на участке плавного перехода принимают форму пространственных кривых. Расчет по данной формуле затруднен из-за неопределенности допустимой деформации, приводящей к потере устойчивости полки в виде кромковой волнистости.

В работе [201] авторами рассматривается участок плавного перехода с S-образной функцией угла подгибки, для которого зависимость угла от координаты вдоль движения профиля описывается следующей зависимостью:

$$a(x) = Da_n \cdot \sin^k \frac{\rho x}{2L_1},$$

где Da_n - амплитудное значение угла подгибки в данной клетке; k - показатель степени ($k = 2 \div 4$); L_1 - длина участка плавного перехода.

Величина углов подгибки определяется в диапазоне $8 \div 12^\circ$, а предельных углов за переход – в пределах $15 \div 18^\circ$ практически для всех видов материалов и толщин заготовки. Указанные диапазоны углов подгибки за переход существенно отличаются от углов подгибки, применяемых при интенсивных методах формообразования профилей в роликах и зависящих от ряда технологических параметров, что явилось одним из предметов изучения настоящей работы.

Продольные деформации растяжения e в произвольной точке подгибаемой полки в работе [201] определяются геометрически с эмпирической корректировкой коэффициентом k , учитывающим уменьшение продольной относительной деформации вследствие продольного изгиба профиля:

$$e = \frac{1}{2} k \cdot r \cdot \left(\frac{da}{dx} \right)^2,$$

где ρ – расстояние от зоны сгиба до текущей точки; α - текущий угол подгибки; x – координата вдоль линии движения профиля.

Из условия предельного состояния $e = e_{\text{гип}} = s_s / E$ далее определяется граница раздела областей пластических и упругих деформаций:

$$r = \frac{2s_s}{E \cdot k} \cdot \frac{1}{(da/dx)^2}.$$

Поверхность, разделяющая область упругих и область пластических деформаций, более точно представлена экспериментальными данными в той же работе [201]. Схемы формовки с постоянным и переменным радиусом по переходам рассмотрены в работе тех же авторов [316], где приводятся уточняющие соотношения для вычисления продольных деформаций полок с учетом изменения их ширины вследствие изменения размеров угловой зоны.

В работе [320] рассмотрен процесс деформирования, в котором срединная поверхность на участке плавного перехода считается линейчатой, а перемещение точек подгибаемого элемента происходит в результате их поворота на нормалях к срединной поверхности (гипотеза Кирхгофа-Лява). Авторы считают, что гофрообразование (кромковая волнистость) является следствием пластических деформаций подгибаемой полки, которые зависят в первую очередь от назначаемых углов подгибки за переход (Da), ширины полки (b) и толщины материала заготовки (S). Иллюстрацией такой зависимости служат рис. 1.117 и рис. 1.118, построенные на основании данных работы [321]. Причем с увеличе-

нием ширины полки приобретаемые пластические деформации имеют тенденцию к увеличению.

Влияние оборудования и режимов формообразования профиля не позволяют принять в качестве абсолютного критерия потери устойчивости подгибаемых элементов наличие пластической деформации, хотя для профилей с толщиной стенки более 1,5 мм такое утверждение можно было бы считать справедливым. У заготовок толщиной свыше 3 мм удлинение кромки, превышающее 0,2 %, приводит к продольному изгибу всего профиля [319], а величина продольной деформации должна определяться возможностью последующей правки профиля.

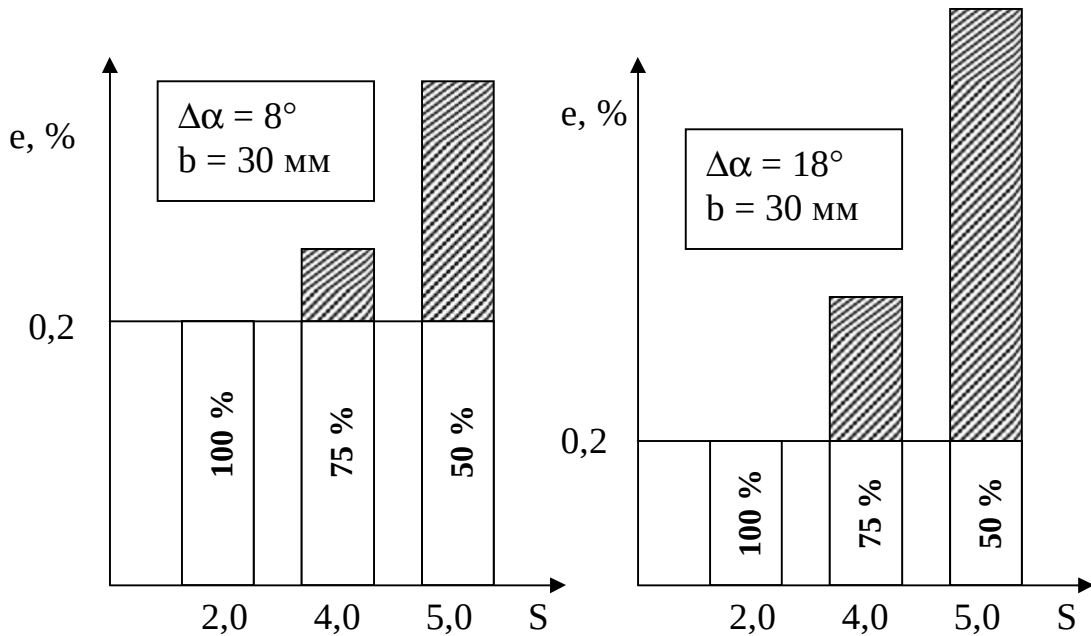


Рис. 1.117. Количество профилей с упругой деформацией полки

Рис. 1.118. Количество профилей с упругой деформацией полки

Для интенсивных методов формообразования профилей назначение углов подгибки должно быть более выверено на основе тщательных исследований, поскольку речь идет о существенном уменьшении числа формирующих клеток при обеспечении прямолинейности профиля.

1.7.4. Потеря устойчивости элементов заготовки

С проблемами потери устойчивости элементов профиля, в частности с их кромковой волнистостью, разработчики технологий формообразования тонколистовых заготовок в роликах столкнулись давно [144], однако особую остроту эти проблемы приобрели лишь в последние годы в связи с расширением номенклатуры тонкостенных широкополочных профилей. Кромковая волнистость возникает как при обычном профилировании, так и при стесненном изгибе [3], причем расчет устойчивости может вестись как в упругой, так и в пластической области.

В упругой области для оценки условий потери устойчивости часто применяют классическую модель Л. Эйлера [276] с различными условиями закреп-

ления концов образца и ограничением по величине его гибкости λ . За пределом пропорциональности применяется модель Энгессера-Шенли [279]:

$$\sigma_{кр} = \pi^2 E_k / \lambda^2,$$

где $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение сжатия; E_k – касательный модуль к кривой «напряжения-деформации» $\sigma = \sigma(\epsilon)$ в пластической области; λ – гибкость образца.

Для оценки устойчивости пластин, подвергнутых сжатию вдоль короткой стороны используют известную модель [41]:

$$\sigma_{кр} = 3,6 E (s/b)^2,$$

где E – модуль Юнга; s – толщина пластины; b – ширина пластины.

Расчет по данной формуле нижнего значения относительной ширины пластины из алюминиевого сплава с пределом текучести порядка 300 МПа дает величину ~ 30 . Это означает, что для алюминиевых сплавов расчет можно вести лишь при относительной ширине полки более 30 толщин заготовки.

При решении технологической задачи устойчивости полки профиля под действием сжимающей силы критическое напряжение вычислено по аналогичной формуле с коэффициентом 2 вместо 3,6 ввиду иного задания граничных условий [121].

Для алюминиевых сплавов (без явно выраженной площадки текучести), критические напряжения за пределом пропорциональности можно вычислять по эмпирической формуле Тетмайера-Ясинского [279]:

$$s_{кр} = s_0 - c \cdot b/s,$$

где s_0 , c – константы материала, имеющие размерность напряжения.

Подсчет предельного отношения b/s для алюминиевого сплава Д16 ($\sigma_0 = 488$ МПа, $c = 80$ МПа) при шарнирном опирании кромок удлиненной пластины дает величину 36, что близко к предшествующему результату работы [41].

Обобщенная модель устойчивости пластин для простейших видов нагружения дана в работе [323]:

$$s_{кр} = K_s \cdot \frac{p^2 \cdot D}{b^2},$$

где K_s – коэффициент, учитывающий соотношение сторон и действующих сил; D – цилиндрическая жесткость.

С помощи теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшиным получено точное решение задачи об устойчивости сжатой в одном направлении шарнирно опертой пластины за пределом пропорциональности [3] с использованием секущего $E_c = \text{tga}$ и касательного модулей $E_k = \text{tga}_k$:

$$s_{кр} = [p^2 E_c / 12(1 - m^2)] \cdot [2 + \sqrt{1 + 3E_k / E_c}] \cdot (s/b)^2,$$

где s и b – соответственно толщина и ширина шарнирно опертой пластины, сжатой в одном направлении; E_k и E_c – определяются по диаграмме σ – ϵ для данного материала (рис. 1.119), μ – коэффициент Пуассона.

Данная формула справедлива для материалов без явно выраженной площадки текучести (легированные стали, алюминиевые сплавы). В случае материала с площадкой текучести в последней формуле следует положить $E_k = 0$, а $\mu = 0,5$, что приводит к следующему результату: $s_{кр} = 3,3 \cdot E_c (s/b)^2$. Данная формула аналогична приведенным ранее формулам, относящимся к устойчивости пластин, и по сравнению с точным решением дает ошибку не более 4,5% [3].

Отметим, что касательный модуль использовался и в теории Кармана [323] для формирования одноименного коэффициента при исследовании устойчивости пластин в закритической области.

Приведенные классические решения задач устойчивости пластин в закритической области в приложении к технологии часто далеки от реальности, что обусловлено как отклонением реальных объектов от исходных посылок классической теории, так и спецификой факторов нагружения. В этой связи получила распространение инженерная теория устойчивости пластического деформирования, основанная на приближенных критериях [324]. В этом случае полагают, что пластическое деформирование устойчиво, если положительна работа добавочных нагрузок $\sum_i dP_i dl_i > 0$. Здесь l_i - обобщенные перемещения, на которых совершают работу обобщенные силы P_i .

Часто в качестве результата неустойчивости принимается не потеря устойчивости «вообще», а неустойчивость, приводящая к недопустимому изменению формы заготовки/детали. В этой связи рассмотрим некоторые технологические задачи, связанные с потерей устойчивости элементов профиля.

В работе [284] экспериментально изучен вопрос возникновения кромковой волнистости при изготовлении желобчатых профилей с фланцами из заготовок шириной от 94 до 200 мм и толщиной от 0,4 до 2,0 мм при изменении вертикального и бокового углов захода профиля в роликовых калибров. Установлена зависимость продольной остаточной деформации полки от степени «стеснения» профиля (отношения ширины заготовки B_3 к ширине профиля B) (рис. 1.54) при отношении высоты профиля к ширине проема калибра $H/l = 0,2$ и угле захода $= 6^\circ$, а также ряд других характерных зависимостей. К сожалению, в указанной работе не предпринята попытка обобщения результатов исследований на другие типоразмеры профилей и выработки общего критерия возникновения кромковой волнистости.

В аналогичной работе [283] исследовано влияние ширины заготовки и зазора в роликовом калибре на форму зоны, прилегающей к кромке, а также про-

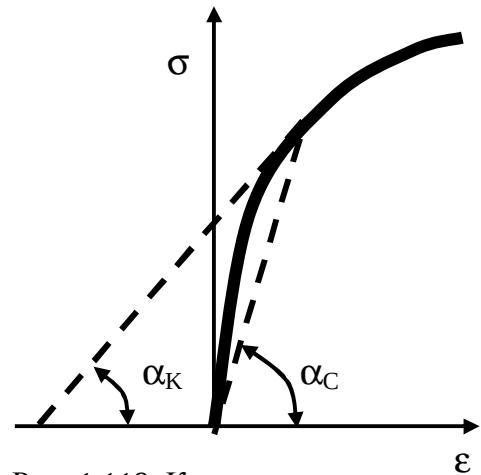


Рис. 1.119. К определению модулей E_k и E_c

дольный изгиб заготовки. Приведенные экспериментальные данные не связаны аналитическими зависимостями и не систематизированы.

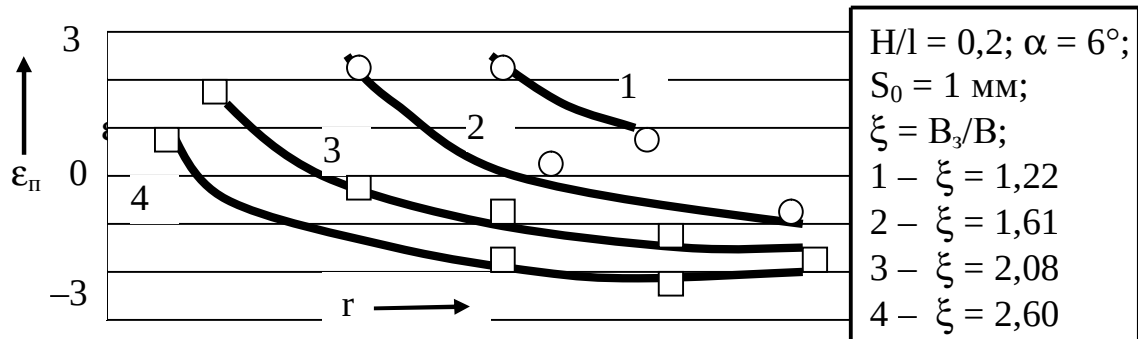


Рис. 1.120. Распределение продольной деформации по ширине

фланца: □ — кромковая волнистость возникает; ○ — не возникает

Обзорные статьи М. Киути [325, 326] затрагивают как вопросы оптимизации технологии, так и проблемы конструкции оборудования и систем контроля при профилировании. Следует отметить указание автора на возможность появления на поверхности профиля линий Чернова – Людерса, которые действительно возникают при формообразовании профилей с элементами жесткости из оцинкованной стали при жесткой схеме формообразования (несколько таких случаев имели место при отработке технологии интенсивного формообразования).

В работе [3] рассмотрены несколько технологических задач, решенных различными авторами:

- обжим контура замкнутого профиля валками при многопереходной гибке. Здесь устанавливается связь критических напряжений и допустимого радиуса с относительной шириной боковой стенки;
- равновесие элемента, контактирующего только с одним валком. Потеря устойчивости элемента связывается с положением точки перегиба графика функции его продольного изгиба;
- устойчивость профиля с многоэлементными отбортовками, где предложены меры по уменьшению продольных деформаций полок и устранению перекривки заготовки;
- устойчивость полки профиля в зависимости от ширины плоского бокового элемента. Указаны меры по уменьшению или устранению волнистости за счет изменения ширины профиля в приемлемую для заказчика технологию сторону.

Расчетные процедуры и технологические рекомендации в указанных задачах носят частный характер и ориентированы на традиционное профилирование с использованием значительного числа переходов.

Остановимся на работах, в которых для предотвращения устойчивости периферийных элементов предложено использование технологических гофр.

В работе [327] авторы рекомендуют предварительный упругий изгиб полки в направлении, противоположном изгибу угловых зон, с последующим

их выпрямлением с целью уменьшения деформаций наружных слоев зон сгиба и утонения покрытия. Данное техническое решение, к сожалению, приводит к повышенным контактным напряжениям у основания зоны сгиба со стороны подгибаемой полки и нарушению покрытия.

Целью работы [328] было предупреждение волнистости кромок за счет того же приема, что и в работе [327]. Автор дает сравнительный анализ реального момента сопротивления полки W_{Π} с моментом сопротивления продольному изгибу сектора тонкостенного кругового кольца W_K :

$$W_{\Pi} = R^3 \cdot s \cdot [\pi \cdot \alpha \cdot 180^{-1} + \sin \alpha - \pi \cdot \alpha \cdot 180^{-1} \cdot b \sin^2 \alpha / 2] \cdot [2 (R - y_c)]^{-1},$$

$$W_K = b \cdot s^2 / 6,$$

где R – радиус изгиба полки; y_c – расстояние от центра кривизны до центра тяжести сектора; α – центральный угол, опирающийся на сектор.

Автор, однако, не смог показать взаимосвязь изменения жесткости элемента и условий предотвращения волнистости кромок. Данный подход был использован нами для формулировки метода локальных жесткостей и создания двух способов формообразования профилей.

В работе [329] показано влияние продольных рифтов/гофр на повышение устойчивости тонкостенных элементов профиля замкнутого сечения при продольном изгибе. В обоснованных случаях по согласованию с заказчиком технологии целесообразно введение продольных неустраняемых рифтов, хотя это, как правило, повышает расход металла и усложняет проектирование технологической оснастки.

В последние годы потребности рынка смещаются в сторону совмещенных процессов формообразования сечения и придания профилю заданной продольной кривизны, в которых также возникает задача предотвращения устойчивости элементов профиля.

Отметим весьма интересную работу [330], где при продольном изгибе критические напряжения полки или стенки профиля (при условии защемления одного из ненагруженных концов и свободном втором) даются следующей формулой:

$$\sigma_{кр} = \pi^2 \cdot E \cdot (\tau^* \cdot (s/b)^2 \cdot K^* / 12 \cdot (1 - \mu^2))^{0,5},$$

где $\tau^* = E_k / E$, $E_k = d\sigma / d\varepsilon$ – касательный модуль истинной кривой упрочнения, соответствующий критическому напряжению $\sigma_{кр}$; K^* – коэффициент устойчивости, зависящий от условий подкрепления краев пластины.

Здесь же определен критический радиус кривизны профиля $r_{кр}$:

$$r_{кр} / y_k = [1,96 \cdot n \cdot E \cdot (S / y_k)^4 \cdot K^{-1}]^{(1+n)^{-1}},$$

где y_k – расстояние от нейтрального слоя крайнего волокна сжатой полки; K и n – константы степенного закона упрочнения.

В отличие от рассмотренных ранее работ здесь критическое напряжение обратно пропорционально относительной ширине полки, что, вероятно, ближе к практическим результатам.

Вопросы расчетов изгиба профилей при использовании трехточечной схемы или локальной раскатки рассмотрены в работе [331]. Модель обратного

изгиба профиля, представленная в данной работе, применена нами при формулировке условий возникновения кромковой волнистости полки при производстве тонкостенных швеллеров.

В последние годы широкое развитие получили численные методы решения задач формообразования [332], в частности, метод конечных элементов, на базе которого созданы мощные прикладные программы универсального назначения [333], а также узкоспециализированные программы расчета параметров процесса профилирования, иногда интегрированные в САПР [334, 335]. Кроме технических проблем (вырождения элементов, бифуркации, расходимости и т. п.), возникающих в некоторых трехмерных задачах формообразования, существует и ряд недостатков применения таких систем: высокая стоимость приобретения (от нескольких десятков тысяч евро и выше) и эксплуатации, ориентация пакетов программ на многопереходную гибку (традиционное профилирование), ничтожная окупаемость при использовании в небольших компаниях-производителях профильной продукции. Вместе с тем, применение универсальных программ является действенным инструментом верификации аналитических решений, полученных на основе моделей механики деформируемого твердого тела.

Резюмируя рассмотренные подходы к решению задач устойчивости, надлежит отметить, что формулировка условий устойчивости деформирования при использовании методов интенсивного формообразования должна приводить к определенным ограничениям на условия реализации технологического процесса. В частности, одним из важнейших факторов при профилировании является число переходов.

1.7.5. Число переходов при профилировании

В работе [325] обсуждаются вопросы важности определения минимального числа переходов при профилировании. Этот вопрос решается обычно на основании предшествующего опыта разработчиков и зачастую указывается лишь достаточно широкий диапазон значений числа переходов для профилей определенного типа. Это существенно осложняет формализацию процесса проектирования технологической оснастки для формообразования профиля в роликах. Так, в работе [336] указывается, что для изготовления угловых профилей требуется 3 – 5 пар роликов, для швеллерных профилей – 4 – 7 пар роликов, для корытообразных и С – образных – 6 – 10, для труб и других закрытых профилей – 8 – 12 пар роликов без указания условий осуществления процесса формообразования профилей, их размеров и применяемого материала заготовок. Примерно в 1,5 раза большие значения для количества переходов рекомендуются в справочнике [81].

Несколько иной подход к определению числа переходов дан в работе [326], где на основе опыта проектирования и внедрения процессов профилирования фирмой «Хитачи киндзоку» авторы предприняли попытку учета сложности конфигурации сечения профиля при определении числа переходов путем введения «фактора формы» профиля Φ . Данный показатель для многоэлементных профилей представляется в виде:

$$F = \begin{cases} b^{\Sigma} \cdot n \cdot s_0, & \text{узкий профиль} \\ \frac{B_3 \cdot h \cdot n}{W}, & \text{широкий профиль} \end{cases},$$

где b^{Σ} – суммарная ширина подгибаемой полки, мм; n – число зон сгиба; s_0 – толщина профиля, мм; B_3 , W – ширина заготовки и готового профиля соответственно, мм; h – высота профиля, мм.

На основе накопленного опыта построена зависимость потребного числа переходов от значения фактора формы, определяемого по вышеуказанной формуле. Однако предложенный подход, с нашей точки зрения, обладает рядом недостатков, которые выявились при попытке обобщения опыта проектирования и внедрения более 500 типоразмеров профилей с помощью приведенного фактора формы и соответствующих ему графических зависимостей для определения числа переходов. Расхождение данных составляло от двух до пяти переходов, что объясняется, по-видимому, различными схемами формообразования, иными характеристиками оборудования и технологической оснастки.

Выводы

Конструкции зарубежных и отечественных летательных аппаратов имеют в несущем каркасе значительное количество разнообразных тонкостенных деталей из профилей, которые можно изготавливать методом стесненного изгиба, получая выгодную геометрию зон сгиба профиля и повышенную коррозионную стойкость за счет плакирующего слоя. Такие профили выдерживают на 10 – 12 % большую нагрузку при испытании на местную и общую потерю устойчивости в сравнении с профилями, получаемыми обычной гибкой.

В автомобилестроении, строительстве и других отраслях применяется большое количество гнутых профилей, которые также можно изготавливать методом интенсивного деформирования с целью минимизации капитальных затрат и текущих издержек производства.

Методы интенсивного формообразования гнутых профилей в роликах предпочтительнее с технологической и экономической точек зрения методов гибки в кромкогибочных устройствах, штампах, инструментальных фильерах, в роликах при традиционном профилировании и др.

Указанные методы могут применяться для деформирования как традиционных сплавов, так и малопластичных и композиционных материалов.

Применение промышленного оборудования для традиционного профилирования нецелесообразно для условий мелкосерийного изготовления профилей из-за высокой стоимости, значительных габаритных размеров, большого количества оснастки. Уменьшение габаритов связано с рядом проблем: расчетом оптимальных межклетевых расстояний, энергосиловых характеристик и поиском путей обеспечения прямолинейности профиля в очаге деформации, так как уменьшение числа переходов ведет к поводкам профиля и различным дефектам, сопровождающим процесс деформирования.

Отсутствие моделей процессов формообразования стесненным изгибом, приемлемых технических решений, промышленного оборудования, нормативно-технической документации (на момент начала работы) не позволяло использовать стесненный изгиб для производства профилей и деталей из них для авиационных конструкций и других промышленных объектов.

Анализ схем формообразования гнутых профилей роликах показал, что прямое использование схем традиционного профилирования в методе интенсивного деформирования широкополочных тонкостенных профилей вызывает появление дефектов, в основном, связанных с потерей устойчивости элементов профиля, в большинстве случаев в виде кромковой волнистости (стесненный изгиб неприемлем для освоения указанного класса профилей).

Теоретические работы в области механики деформируемого твердого тела, гибки и профилирования, а также существующая практика выявили необходимость исследования вопросов протяженности зоны плавного перехода, НДС подгибаемых полок, углов подгибки по переходам, размерной точности сечения профиля, числа переходов, условий потери устойчивости и др., определяющих степень интенсификации процесса формообразования. Отсутствие моделей и разработок по МИД сдерживало его широкое применение в промышленности.

2. ПРЕДМЕТ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

2.1. Предмет исследования и разработки

Предметом исследования и разработки являются технологические процессы изготовления в роликах гнутых тонкостенных профильных деталей преимущественно типовой номенклатуры методами интенсивного формообразования (стесненным изгибом и методом интенсивного деформирования), а также соответствующие виды профилегибочного и вспомогательного оборудования.

2.2. Задачи исследований и разработки

Исходя из результатов изучения состояния вопроса, в работе ставятся следующие основные задачи:

- § систематизация факторов интенсификации формообразования профильных деталей преимущественно типовой номенклатуры в роликах и выявление преимущественных процессов для проведения исследований на основе классификации профилей, механических схем приложения сил и дефектов профилей;
- § разработка на основе механики деформируемого твердого тела моделей процессов интенсивного формообразования для создания технологии и оборудования, в частности, моделей угловой зоны, зоны плавного перехода, правильного устройства, оптимизации углов подгибки, прогибов донной части профиля, обеспечения параметров точности, расчета числа переходов и др.;
- § проведение необходимых экспериментальных исследований для верификации математических моделей и отработки технологии;
- § разработка технологии, способов интенсивного формообразования и устройств для их осуществления;
- § разработка отраслевой нормативно-технической документации по изготовлению длинномерных профильных деталей;
- § изготовление оборудования и технологического оснащения для интенсивного формообразования, их внедрение в производство в различных отраслях промышленности.

2.3. Методы исследований

Основными методами теоретических исследований являются методы механики деформируемого твердого тела, в частности:

- § метод прямого интегрирования уравнений равновесия;
- § метод баланса работ;
- § метод линий скольжения;
- § метод конечных элементов;
- § методы оценки устойчивости пологих оболочек и пластин.

Экспериментальными методами исследования напряжений, деформаций и энергосиловых параметров являются:

- § методы и методики механических и коррозионных испытаний материалов;
- § методы металлографии;
- § метод тензометрии;
- § методы экспериментального исследования деформаций (модифицированные методы Смирнова-Аляева и Зибеля);
- § методы измерения твердости;
- § методы рентгеновской микроскопии;
- § методы электронной микроскопии.

2.4. Классификаторы профилей, механических схем процессов и дефектов профилей, раскрывающие предмет исследования и разработки

Рассмотренные в разделе 1 различные аспекты процессов интенсивного формообразования (СИ и МИД) охватывали большое разнообразие профилей и способов их изготовления. Ряд технических решений из практики традиционного профилирования может быть использован в методах интенсивного формообразования профилей. Некоторые из специальных профилей, имеющих элементы жесткости небольших размеров, могут, по-видимому, изготавливаться по схемам, близким к схемам производства профилей типовой номенклатуры. Уточнение указанной возможности и раскрытие предмета исследования требуют рассмотрения не только классификатора профилей, но и классификаторов механических схем процессов и дефектов профилей.

2.4.1. Классификатор профилей с элементами жесткости

Применение вычислительной техники позволяет осуществлять одновременно конструирование детали и процесса ее изготовления на предварительной стадии проектирования [337]. Однако разработанные интегрированные системы проектирования основаны на классификации профилей достаточно простых конфигураций (угловой, швеллерный, корытообразный, С-образный, Z - образный), для которых разработаны эмпирико-аналитические модели [338], не охватывающие класс профилей с элементами жесткости. Например, немецкой фирмой «Data-M» разработано программное обеспечение для холодного профилирования ленты без включения в него моделей формообразования профилей с элементами жесткости [339]. Отсутствие работ по классификации профилей с элементами жесткости и моделей их формообразования существенно снижает возможности систем автоматизированного проектирования и изготовления (CAD/CAM) таких профилей, которые традиционно относят к разряду специальных профилей и не включают в системы САПР.

Для типизации номенклатуры профилей существует ряд классификаторов [201, 340], однако они не учитывают наличие на них элементов жесткости и обычно исключают такие профили, относя их к разряду специальных. Можно расширить охват классификаторов за счет включения в них некоторых видов профилей с типовыми элементами жесткости. Выявление типологии и систе-

матизация элементов жесткости также важны для обеспечения преемственности типовых проектных процедур применительно к процессам интенсивного деформирования. На рис. 2.1 изображен специальный профиль с типовыми элементами жесткости, который выполняется по той же технологической схеме, что и аналогичный классический профиль с некоторыми модификациями в части совмещения технологических схем выполнения элементов жесткости с формообразованием контура основной конфигурации.

Элементы жесткости можно классифицировать по конструктивно-технологическим признакам с целью включения их в САПР. Следует отметить, что классификация их только по конструктивным признакам не является достаточной, поскольку положение элемента жесткости предполагает специфическую для данного положения (хотя и типовую) схему формообразования. Элементы жесткости рассматриваются по отношению к базовому элементу профиля (обычно стенке), подверженного наименьшей деформации. На рис. 2.2 приведен классификатор типовых элементов жесткости, составленный по следующим параметрам классификации:

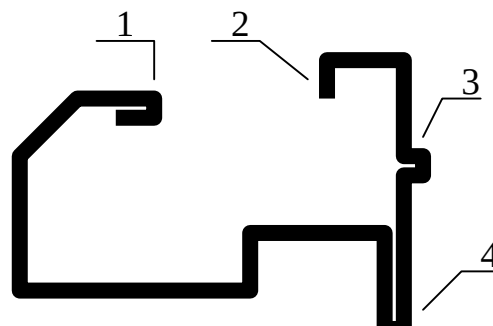


Рис. 2.1. С-образный профиль с типовыми элементами жесткости: 1 – элемент двойной толщины; 2 – отбортовка; 3 – рифт; 4 – петельный элемент

- Тип элемента жесткости (DT \double thickness\ - элемент двойной толщины; F \flange\ - отбортовка; R \riffle\ - рифт; L \loop\ - петельный элемент);
- Вид элемента жесткости в пределах данного типа (p \partial \ - отбортовка неполная; f \ full \ - отбортовка полная; e \ exaggerated \ отбортовка с поднутрением; w \ wave \ - рифт волнообразный, a \ arc \ - рифт дугобразный; c \ cannellure \ - рифт-каннелюра; t \ trapezium \ - рифт трапециевидный или треугольный; d \ in depth \ - рифт объемный; lrw \ loop having right walls \ - петельный элемент с прямыми стенками; lq \ loop queer \ - петля «сваленная»; lr \ loop right \ - петля прямая; lo \ loop ordinary \ - петля обычная; ld \ loop type door's \ - петля типа дверной);
- Положение элемента жесткости по отношению к оси профилирования (L \ longitudinal \ - рифт продольный; T \ transversal \ - рифт поперечный; Q \ queer \ - рифт косой);
- Назначение (К - рифт конструктивный; Т - рифт технологический, который может быть неустраняемым \ s \ или устраняемым \ r \);
- Степень деформации несущего элемента (F \ folded \ - подгибаемый; U \ unfolded \ -неподгибаемый);
- Тип несущего элемента (h \ horizontal \ - горизонтальный; q \ queer \ -наклонный; v \ vertical \ - вертикальный);
- Расположение относительно несущего элемента (n \ neutral \ - нейтральный; i \ inside \ -внутренний; o \ outside \ - внешний).

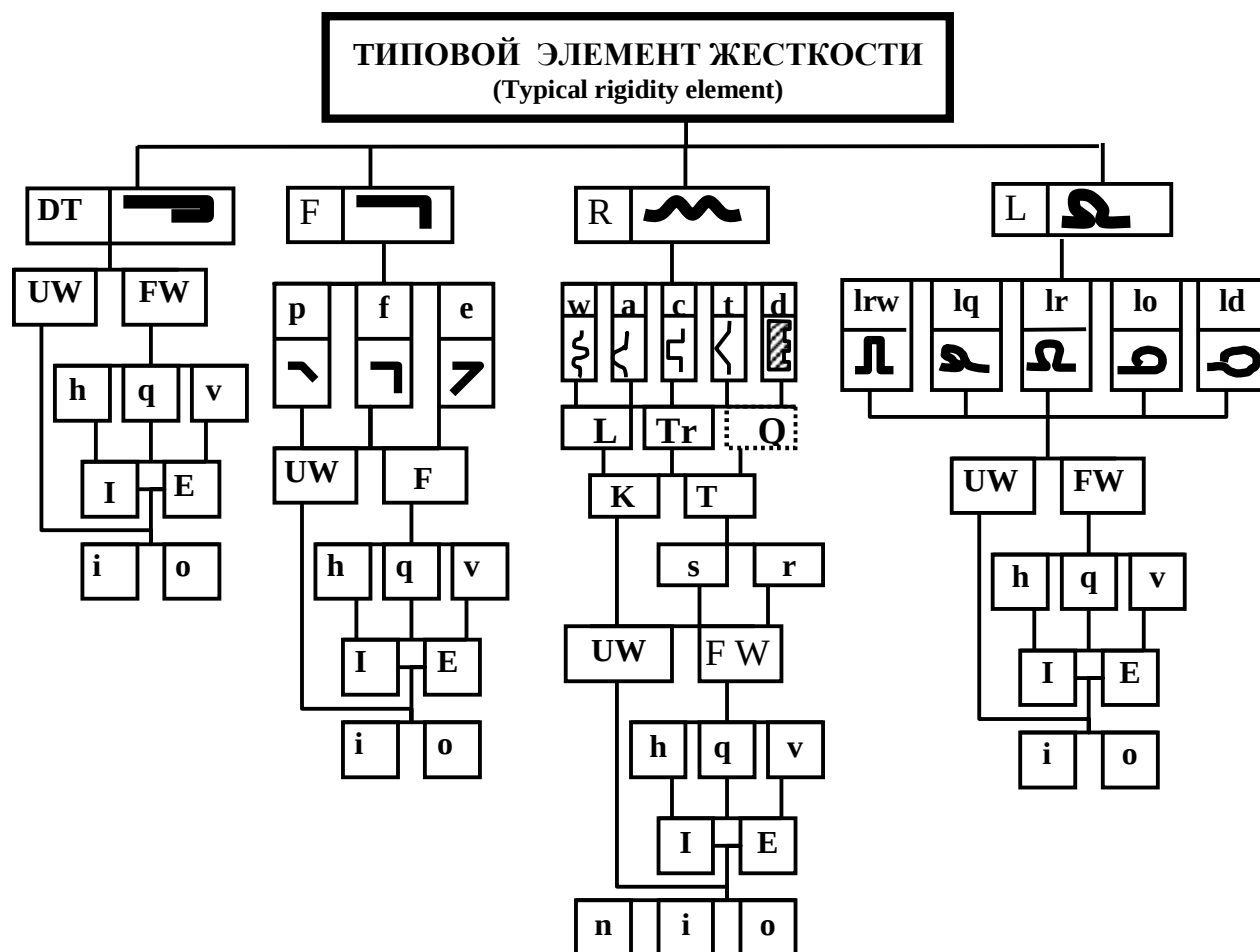


Рис. 2.2. Классификатор типовых элементов жесткости

Концевые элементы двойной толщины могут быть выполнены на подгибаемых или неподгибаемых горизонтальных, наклонных или вертикальных несущих полках. Подгибаемые несущие полки могут быть обращены как во внутрь (схема DT-FW-h,q,v-I), так и наружу (схема DT-FW-h,q,v-I) по отношению к базовому элементу, что определяется наличием или отсутствием проекции концевой точки элемента двойной толщины на базовом элементе профиля соответственно. Надлежит отметить, что представленная классификация отражает скорее технологическую сторону вопроса, чем конструктивную. Так, если выполнение элемента двойной толщины в схеме DT-FW-h,q,v-E-i,o возможно на нескольких последних технологических переходах, то в схеме DT-FW-h,q,v-I-i,o это возможно лишь на нескольких первых переходах. Действительно, в случае подгибки вовнутрь при консольном положении полки, которая должна нести элемент двойной толщины, формообразование последнего невозможно, поскольку воздействие роликового инструмента будет, очевидно, односторонним и приведет лишь к изгибу несущей полки (рис. 2.3, а).

Положение концевого участка заготовки, который может быть обращен вниз (схема DT-FW-h,q,v-I,E-o) или вверх (схема DT-FW-h,q,v-I,E-i) по отношению к несущей полке влияет на степень деформации, которую получает периферийный участок (деформация в схеме DT-FW-h,q,v-E-o меньше, чем в схеме

DT-FW-h,q,v-E-i). Это различие отражается на положении оси профилирования и параметрах жесткости поперечных сечений заготовки профиля вдоль нее, определяя тем самым величину продольного прогиба и уровень остаточных напряжений.

Схемы, определяющие положение элемента двойной толщины на неподгибаемой полке с различным направлением подгибки (схемы DT-UW-i и DT-UW-i) хотя и эквивалентны с точки зрения формообразования самого элемента, однако, не являются равноценными по отношению к такой характеристике качества, как отсутствие скрутки. В этом случае удовлетворительные результаты могут быть получены за счет поворота базового элемента вокруг оси профилирования (рис. 2.3, б).

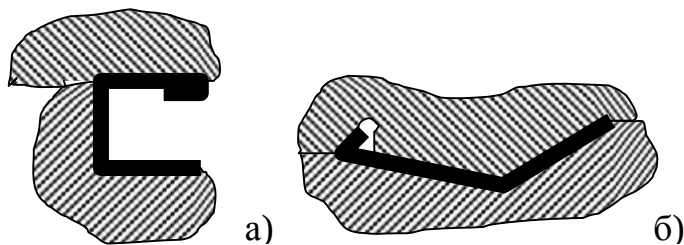


Рис. 2.3. Формообразование элементов двойной толщины: а) – при расположении на подгибаемой во внутрь горизонтальной полке; б) – при расположении на неподгибаемой полке

Проблемы формообразования отбортовок также связаны с обстоятельствами последовательности формирующих операций. В схеме F-p,f,e-FW-h,q,v-I выполнение отбортовки возможно лишь на первых переходах, в то время как схема F-p,f,e-FW-h,q,v-E допускает формообразование отбортовки и на нескольких последних переходах. В случае формообразования отбортовок малой высоты (менее четырех толщин исходной заготовки) удовлетворительные результаты можно получить за счет применения технологических устранимых рифтов дугообразной формы R-a-L-T-r [341].

Выполнение технологических или конструктивных рифтов, которые могут быть продольными, поперечными или косыми, возможно на подгибаемых или неподгибаемых полках (базовые элементы). Косые рифты, хотя и возможны, однако, на практике не применяются из-за сложности изготовления формирующего инструмента и отсутствия соответствующих технологических разработок. Поперечные рифты также имеют ограниченное применение, чаще всего в технологических целях. Рифты отличаются от контурных сегментов своими относительно малыми размерами по отношению к основным элементам профиля. Обычно депланация элемента типа «рифт» не превышает 5-8 толщин материала.

Технологические рифты могут быть двух видов: устранимые и неустраиваемые в процессе формообразования. В том и другом случае для их формообразования не требуется избыточная ширина заготовки: рифты получают за счет вытяжки ил пространственного распределения материала заготовки. Для выполнения конструктивных рифтов необходимый запас материала может быть также заложен в расчет ширины заготовки.

Формирование продольных рифтов на неподгибаемых элементах профиля (схема R-w,a,c,t,d-L-K-UW) в технологическом отношении не представляет трудности, однако, вследствие повышения жесткости одной части сечения про-

филя из-за наличия рифтов может приводить к кромковой волнистости подгибаемых полок (при значительной ширине полок и толщине материала заготовки менее 1 мм). Поэтому целесообразно выполнение продольных рифтов на неподгибаемых полках постепенно, с увеличением высоты рифта (и числа рифтов) от перехода к переходу, или же выполнять рифты на последних переходах. Последний вариант, к сожалению, имеет ограниченные возможности в случае замкнутых или полузамкнутых профилей. Удовлетворительные результаты дает применение уравнивающей формовки конструктивных и технологических рифтов на различных полках. Проведенные исследования по использованию технологических рифтов на нескольких десятках типоразмеров профилей с целью повышения их качества, показали высокую эффективность данного подхода.

Выполнение рифтов на подгибаемых полках (схема R-w,a,c,t,d-L-K-FW) может быть реализовано, в основном, при горизонтальном положении полок или в положении с небольшими углами подгибки (до 15-20 градусов) на первых переходах. При больших углах подгибки не происходит замыкания контура рифтов из-за поднутрения (особенно при формировании рифтов прямоугольной формы). На промежуточных и последних переходах продольные рифты могут быть выполнены только по схеме R-w,a,c,t,d-L-K-FW-h,q при условии горизонтального или близкого к нему положения соответствующей полки. Однако, на периферийных элементах возможно изготовление продольных и поперечных рифтов и в наклонном положении с использованием соответствующей оснастки (дополнительных неприводных роликов типа проводок в межклетьевом пространстве профилегибочного станка).

Положение рифта по отношению к базовому элементу профиля и по отношению к подгибаемой полке оказывает существенное влияние на общую схему формообразования и форму применяемого технологического оснащения. Более предпочтительной является схема с расположением рифтов вовнутрь, поскольку в этом случае обеспечивается относительно равномерное распределение сил по ширине подгибаемой полки, предотвращающее появление желобчатости последней.

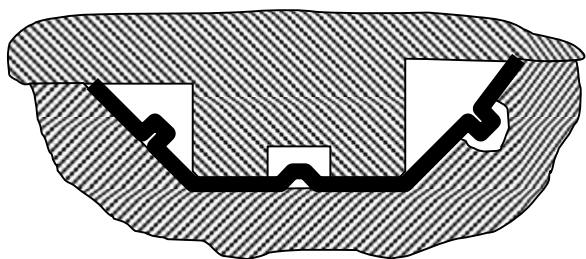


Рис. 2.4. Участки высвобождения при формообразовании рифтов

Нижние ролики последних переходов в этом случае могут иметь ту же конфигурацию, что и для изготовления аналогичного профиля с плоскими элементами. В верхних роликах надлежит предусматривать участки высвобождения для прохождения рифтов (рис. 2.4).

Несимметричное расположение рифтов по отношению к базовому элементу приводит к скрутке профиля при одних и тех же углах подгибки полок, поскольку жесткость полок и их деформации оказываются различными. Скрутка может быть уменьшена за счет использования технологических рифтов, уменьшающих асимметрию характеристик жесткости, или за счет назначения различных углов подгибки для полок. Аналогично, неблагоприятное располо-

жение рифтов по донной части профиля и подгибаемым полкам приводит к продольной кривизне профиля, которая может быть предотвращена за счет выбора схемы формообразования или режимов формообразования и правки.

Размеры и конфигурация рифтов могут весьма существенно влиять на схему формообразования, так как жесткость элемента профиля является функцией размеров, конфигурации, числа и расположения рифтов. Это обстоятельство надлежит учитывать при оценке характеристик жесткости сечения и элементов профиля в каждом из технологических переходов при разработке схем формообразования.

Петельные элементы жесткости могут располагаться на неподгибаемых или подгибаемых горизонтальных, наклонных или вертикальных элементах. Петельные элементы могут быть с прямыми стенками, наклонными, прямыми, в форме обычной или выгнутой (типа дверной) петли. По отношению к базовому элементу петельные элементы могут выполняться на внутренней или наружной стороне подгибаемых полок.

Выполнение петельных элементов связано со значительной боковой утяжкой материала, что может приводить к кромковой волнистости при небольшой толщине материала. В этом случае возможно использование устраиваемых технологических дугообразных рифтов или специальных проводок. Наклонные петельные элементы (lq) можно формировать первоначально прямыми с последующим боковым воздействием на элемент жесткости (так называемое «сваливание»). Формообразование косых петельных элементов последовательной подгибкой не является технологичным.

Таким образом, представленный классификатор, сформированный по конструктивно-технологическим признакам, позволяет упорядочить набор элементов жесткости гнутых профилей и выявить групповые особенности их формообразования. На основе классификатора возможна формализация процедур проектирования операций формообразования типовых элементов жесткости с последующим их включением в общую схему формообразования профилей модифицированных конфигураций.

2.4.2. Классификация механических схем приложения сил

Интенсивные методы деформирования заготовки в роликах являются сложными технологическими процессами, сочетающими всевозможные схемы приложения сил к заготовке, а также их последовательность и характер изменения. На рис. 2.5. представлены схемы действия приложенных к заготовке сил и моментов. Следует отметить, что отдельные схемы приложения внешних сил к заготовке в процессах гибки приведены в работе [273]. При интенсификации процессов профилирования происходит как бы наложение нескольких схем друг на друга, что существенно осложняет анализ процесса. Для некоторых частных случаев классификатора механических схем приложения сил были разработаны соответствующие классификаторы способов изготовления профилей в роликах [27, 33, 199, 342].

В схемах рис. 2.5 нами не учтены случаи радиального растяжения внутреннего и наружного контуров, поскольку такие схемы на практике не реали-

зуются (хотя в классификации операций гибки такие схемы приводятся [273]). Торцевая сила T считается однонаправленной, хотя в реальности для некоторых участков имеет место растяжение при перетяжке материала. Последнее характерно лишь для локальных зон в методе интенсивного деформирования и в необходимых случаях такая ситуация может быть рассмотрена с учетом обращения знака торцевой силы. При этом описание процесса деформирования будет существенно отличаться от описания процесса гибки с торцевым сжатием. К сожалению, до настоящего времени никому из исследователей не удалось получить универсального замкнутого аналитического решения, учитывающего влияние торцевой силы различных знаков и дающего правдоподобные решения в предельных случаях (например, выход нейтрального слоя на внутреннюю или наружную поверхность при соответствующем значении сжимающей или растягивающей торцевой силы). Это связано с ограниченными возможностями моделей МДТТ и соответствующего математического аппарата.

Что касается аксиальных сил P_1 и P_2 , то с учетом знака этих сил здесь имеются четыре возможности для их комбинаций. Примем, что движение про-

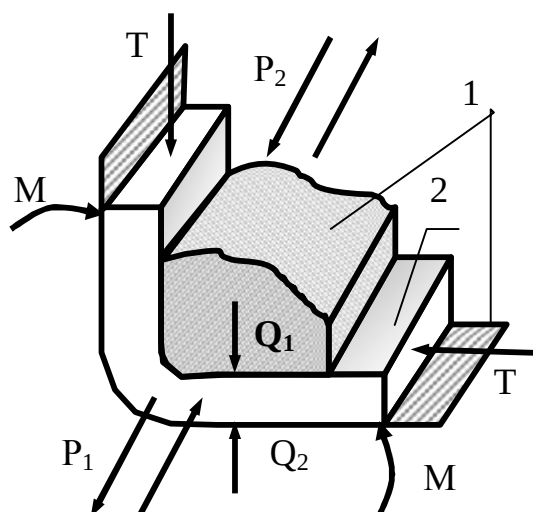


Рис. 2.5. Схемы приложения сил к заготовке: 1 – формующий инструмент; 2 – заготовка

филя происходит за плоскость рис. 2.5. от нас, причем, значение аксиальной силы будем считать положительным, если ее вектор направлен от выделенного элемента. В противном случае значение силы считаем отрицательным. Случай $P_1 = 0$, $P_2 = 0$ соответствует гибке прокаткой в отсутствие аксиальных сил. Указанные выше возможные комбинации представляются следующими сочетаниями: 1) $P_1 > 0$, $P_2 > 0$; 2) $P_1 > 0$, $P_2 < 0$; 3) $P_1 < 0$, $P_2 < 0$; 4) $P_1 < 0$, $P_2 > 0$. Следует заметить, что при формообразовании профиля силы P_1 и P_2 вовсе не обязаны быть равными по модулю, поскольку возможно удержание профиля

в калибре за счет сил трения, возникающих между роликами и заготовкой.

Механическая схема 1), реализуемая в процессах чистого волочения, соответствует деформированию заготовки с передним и задним натягом, например, при сочетании клеток с холостыми роликами и клеток с приводными роликами и реализацией режима волочения профиля по его выходу из калибра последней пары роликов [19, 20, 28, 116]. Частный случай данной схемы, когда для последнего перехода $P_2 = 0$, находит наибольшее применение в методе интенсивного деформирования для обеспечения натяжения кромки и рассмотрен в настоящей работе [168].

Механическая схема 2) может быть осуществлена путем последовательной комбинации: холостые валки – приводные валки – валки с торможением (меньшего диаметра, чем приводные или с зазором калибра меньше толщины заготовки). Впрочем, для последнего перехода торможение может обеспечи-

ваться также правильным или специальным тормозящим устройством [29, 33]. Для возникновения ощутимого эффекта от аксиальных сил требуется обеспечение достаточной жесткости сечения профиля к переходу, где происходит его сжатие, во избежание потери устойчивости.

Механическая схема 3) реализуется в условиях всестороннего сжатия за счет торможения профиля в каждой из последующих клеток. Возможности данной схемы ограничиваются малой жесткостью профиля на первых переходах, что характерно для метода интенсивного деформирования. Однако при стесненном изгибе заготовки уже в первом переходе придают волнообразную форму, обладающую достаточной жесткостью для обеспечения аксиального поджатия, в связи с чем она может считаться достаточно перспективной. В случае небольшого (в пределах упругости) обжатия заготовки по толщине без приложения аксиальных сил происходит вытяжка материала в аксиальном направлении (обычно до (2 – 3) %, а в пределе – до 7 %) из-за специфических условий формообразования, связанных с осадкой и раскаткой материала в осевом направлении. Аксиальное сжатие приводит к уменьшению / устранению вытяжки, способствует лучшему заполнению угловой зоны, поэтому в качестве модели заполнения уголка и для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния следует рассматривать схему плоско деформированного состояния в зоне сгиба.

Область применения схемы – производство профилей небольших габаритных размеров с умеренной толщиной заготовки (например, 50x50x1,0÷2,5 мм) из алюминиевых сплавов [33, 343] методом стесненного изгиба. Эта схема исследуется в работе.

Механическая схема 4) может получить реальное воплощение лишь в последней/предпоследней клетки профилегибочного станка при наличии тянущего устройства на выходе или при назначении увеличенных диаметров формующих роликов последней клетки по сравнению с диаметрами роликов предшествующих клеток (в случае реализации данной схемы в предпоследней клетки) [94, 165]. Данная схема имеет весьма ограниченное применение.

Таким образом, базовая (чистая) схема ($P_1 = 0$, $P_2 = 0$), а также схемы 1) и 3), ввиду их перспективности для целей интенсификации процесса формообразования профилей, подлежат изучению в последующих разделах книги.

После исключения из рассмотрения отрицательных значений Q_1 и Q_2 (см. обсуждение данного вопроса выше по тексту), дальнейшая классификация процесса формообразования с учетом знака и значения радиальных сил (см. рис. 2.5) дает схемы: свободной гибки (гибки моментом или гибки моментом с небольшой подсадкой: $Q_1 = 0$; $Q_2 = 0$), посадки заготовки на наружный контур ($Q_1 = 0$; $Q_2 < 0$), посадки заготовки на внутренний контур ($Q_1 < 0$; $Q_2 = 0$), двустороннего обжатия ($Q_1 < 0$; $Q_2 < 0$). Все указанные схемы представляют значительный практический интерес, однако схема посадки заготовки на внутренний контур в осевой плоскости валов клетки реализуется лишь при отсутствии торцевого поджатия или в схемах, допускающих перетяжку заготовки (в схемах формовки сложных профилей несимметричных сечений).

Процессы, включающие различные комбинации внешних сил, приводящих к интенсификации процесса формообразования, будут рассмотрены в последующих разделах. Отметим, что схемы формообразования и режимы реализации процесса определяют величину и характер изменения внешних сил, а также качество профильной продукции. При отработке технологии часто приходится сталкиваться с различными видами дефектов (см. раздел 1.4, где описаны дефекты, характерные большей частью для метода стесненного изгиба; см. также рис. 1.46).

Для метода интенсивного деформирования характерна несколько иная классификация дефектов (рис. 2.6), возникающих в процессе формообразования профиля [344].

2.4.3. Классификатор дефектов профилей при использовании МИД

Дефекты пространственной формы возникают вследствие различного вида нарушений режимов и схем формообразования. Продольный прогиб профиля (рис.2.6, схема 1.1.; рис. 1.45-а) может иметь место вследствие следующих причин: ошибка в выборе диаметров формующих роликов [345], неверное положение оси профилирования в вертикальной плоскости [346], неравномерный зазор роликового калибра [7], отклонения ширины заготовки [225], неверная настройка правильного устройства [347]. Эта разновидность дефектов наблюдается на профилях практически всех типоразмеров, что связано с различием продольных деформаций подгибаемых полок и дна профиля вследствие нарушения режимов и схем формообразования [348]. Продольный прогиб до некоторой степени устраняется настройкой правильного устройства, однако его воздействие при большой кривизне выходящего профиля может приводить к появлению неустраняемого дефекта – кромковой волнистости (рис.2.6, схема 3.1). Отметим, что продольный прогиб профиля имеет место в межклетьевом пространстве, причем, величина прогиба существенно зависит от углов подгибки боковых полок, конфигурации сечения профиля, толщины заготовки и ее материала.

Саблевидность профиля (рис.2.6, схема 1.2; рис.1.45-б) происходит в виду следующих причин: неверное положение оси профилирования в горизонтальной плоскости [346], неравномерный зазор роликового калибра [7], боковое смещение заготовки на предварительных переходах [225], саблевидность исходной заготовки (более 3 мм/м) [7], ошибочная схема формообразования несимметричного профиля [33], неверная настройка правильного устройства [347]. Данный вид дефектов возникает весьма редко в процессах формообразования симметричных профилей при соблюдении схем и режимов их производства.

Скрутка профиля (рис. 2.6, схема 1.3, рис. 1.45-в) может происходить из-за ошибок в выборе схем формообразования [33], смещения оси профилирования [346], неравномерности зазора в роликовых калибрах [7], отклонений параметров заготовки (ее саблевидности, разнотолщинности или избытка ее ширины при использовании закрытых роликовых калибров), неправильной настройки правильного блока [7].

Наибольшей скрутке подвержены несимметричные профили, хотя в большинстве случаев скрутка может быть устранена соответствующей настройкой правильного устройства [33, 7]. Устранение скрутки реже приводит к потере устойчивости периферийных элементов профиля, чем предотвращение продольного прогиба профиля с помощью правильного устройства. Скрутка является следствием несбалансированности деформационных характеристик подгибаемых полок. В традиционном профилировании предупреждение скрутки профилей отчасти достигается за счет подгибки полок на различные углы [201], за счет комбинации подгибки и разгибки меньшей по ширине полки [1], а также за счет поворота сечения профиля относительно оси профилирования.

Отклонение размеров сечения профиля от номинальных размеров проявляется в недоформовке профиля по высоте (рис. 2.6, схема 2.1; рис. 1.45-г), отклонениях по ширине (рис. 2.6, схема 2.2; рис. 1.45-д), пружинении (рис. 2.6, схема 2.2. рис. 1.14-е) и отклонениях кривизны зон сгиба (рис. 2.6, схема 2.4; рис. 1.145-ж). Недоформовка профиля по высоте связана с заниженной шириной заготовки или с раскрытием роликового калибра. Отклонения по ширине профиля часто происходят из-за изменения кривизны зоны сгиба в процессе деформирования, связанной с пружинением. При разгрузке (выходе профиля из калибра очередной пары роликов) возникает уширение профиля даже в отсутствие значительных отклонений угловгиба [201]. При традиционном профилировании пружинение является значительным, поэтому к последнему переходу угол подгибки уменьшают, поскольку величина пружинения $\Delta\Theta$ прямо пропорциональна углу подгибки Θ [201, 273]:

$$\Delta\Theta = \frac{3 \cdot \sigma_T}{E} \cdot r \cdot \Theta ,$$

где σ_T , E – предел текучести и модуль Юнга материала соответственно, МПа;
 r – внутренний относительный радиус зоны сгиба.

При стесненном изгибе пружинение может быть даже отрицательным в связи с осадкой заготовки в замкнутом калибре [33]. При интенсивном деформировании пружинение несколько меньше, чем при традиционном профилировании, однако его необходимо учитывать при разработке схем формообразования.

Депланации элементов готового профиля регламентируются соответствующими нормативными документами [216, 7]. Кромковая волнистость (рис. 2.6, схема 3.1; рис. 1.145-з) – наиболее часто встречающийся дефект при изготовлении тонкостенных широкополочных профилей [161]. При высокой жесткости подгибаемых полок может иметь место как кромковая волнистость, так и излом полки. Эти виды дефектов являются причиной, препятствующей сокращению числа переходов [81].

"Хлопуны" на донной части профиля (рис. 2.6, схема 3.2; рис. 1.145-и) возникают при изготовлении широких профилей и профилей с большим числом зон сгиба, жесткость подгибаемых полок которых достаточно велика, чтобы противостоять потере устойчивости. При этом в донной части профиля возникает прогиб типа горба, который при осадке порождает "хлопуны" – области локального выпучивания.

Возникновение мелких поперечных гофр вблизи элементов жесткости (рис.2.6, схема 3.3; рис 1.145-к) наблюдается крайне редко и только при толщинах заготовки менее 1.0 мм в случаях осадки элементов жесткости типа рифтов. Причиной их является, по-видимому, неблагоприятное сочетание силовых факторов при осадке участка донной части заготовки с резким изменением жесткости в локальной области.

Дефекты поверхности профиля проявляются в виде задиров, царапин, разрушения покрытия (рис. 2.6, схемы 4.1 – 4.3), а также его расслоения (рис. 2.6, схема 4.2; рис. 1.45-л). Причиной задиров, царапин и нарушений покрытия могут быть жесткие схемы формообразования (большие контактные напряжения) [341, 349], неудовлетворительное качество поверхности формующих роликов [33], неравномерный зазор в калибре [7], избыточная ширина заготовки при изготовлении профиля в закрытых калибрах [27, 258]. При изготовлении тонкостенных стальных профилей без покрытия проблем, связанных с указанными поверхностными дефектами, обычно не возникает. Однако нарушение поверхности профиля может происходить на профилях из алюминиевых сплавов, особенно при наличии плакирующего слоя, и на стальных профилях с покрытием.

Таким образом, предотвращение рассмотренных дефектов при разработке технологии требует систематического изучения их разновидностей, частотности и причин их возникновения, а также выработки эффективных технических решений, направленных на повышение качества профильной продукции. В первую очередь это относится к дефектам, связанным с потерей устойчивости периферийных элементов (в частности, в форме кромковой волнистости), а также к дефектам нарушения покрытия в области расположения элементов жесткости, вблизи зон сгиба (особенно на профилях с толщиной стенок более 1,5 мм). Вопрос обеспечения прямолинейности профиля и предотвращения скрутки также является достаточно актуальным при СИ.

Выводы

Определены предмет, задачи и методы исследования, подлежащие использованию при изучении процессов формообразования гнутых профилей и при разработке технологии их производства.

Классификация элементов жесткости профилей позволила выявить групповые особенности их формообразования в рамках типовых конфигураций профилей и определить для изучения такие элементы как отбортовки, продольные рифты (конструктивные гофры) и технологические гофры.

Из анализа механических схем приложения сил выявлены три наиболее перспективных схемы: а) без приложения аксиальных сил; б) с передним и задним натягом; в) с передним и задним подпором при различных сочетаниях радиальных сил.

Анализ дефектов профилей на основе их классификации выявил актуальность предотвращения следующих дефектов: продольного изгиба профиля при стесненном изгибе, кромковой волнистости и нарушения покрытия при использовании метода интенсивного деформирования.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ В РОЛИКАХ

Обобщенная модель процесса формообразования заготовки в роликах может быть представлена совокупностью зависимостей между параметрами процесса и влияющими факторами, например, в следующем виде:

$$y_i = y_i(S, G, N, R, C, T, EQ, V, M, BQ, FD, SD, ST, GR, X, t),$$

где Ψ_i – параметр процесса (текущее значение i – ой характеристики профиля); S – свойства исходного материала; G – геометрические параметры изготавливаемого профиля по чертежу; N – число переходов; R – схема формовки; C – схема формообразования; T – характеристики технологической оснастки; EQ – характеристики технологического оборудования; V – скоростной режим процесса; M – характеристики настройки оборудования; AD – характеристики вспомогательного технологического оснащения; FD – характеристики устройства подачи; ST – характеристики правильного устройства; GR – условия смазки; X – координаты; t – время.

Однако построение столь сложной модели, представленной выше зависимостью, не представляется возможным по ряду причин:

- сложность процесса;
- ограниченные возможности моделей МДТТ и математического аппарата;
- наличие взаимозависимости между факторами и между параметрами процесса и ряд других.

В этой связи представляется целесообразной разработка частных математических моделей, позволяющих успешно решать технологические проблемы, обусловленные интенсификацией процесса формообразования (см. раздел 1.7). По сравнению с традиционным профилированием приложение к заготовке торцевого поджатия и обеспечение специфических условий деформирования вызывают необходимость исследования НДС угловой зоны, определения пружинения, предельных возможностей, энергосиловых параметров, условий обеспечения правки. Также возникают проблемы определения протяженности зон плавного перехода, оптимизации схем формообразования и углов подгибки элементов, определения числа переходов, изучения новых эффектов, возникающих при формообразовании профилей с широкой донной частью.

С особой остротой встают вопросы дефектов и потери устойчивости элементов профиля. Из основных неустраняемых правкой дефектов профилей – излом полки, линии Чернова – Людерса, хлопуны и кромковая волнистость – последняя является наиболее серьезным и часто повторяющимся (в 80 – 90 % случаев) дефектом при отработке технологии формообразования профиля в роликах.

3.1. Основные допущения при теоретическом рассмотрении процесса

При рассмотрении указанных выше вопросов приняты следующие допущения:



Рис. 2.6. Классификатор дефектов профилей

– при рассмотрении *угловой зоны и осаживаемых участков заготовки* будем считать материал заготовки ортотропным, упрочняемым, несжимаемым, что обусловлено свойствами применяемых материалов и характером процесса (пластическая деформация);

– при определении *протяженности зоны плавного перехода* считаем материал заготовки жесткопластичным, ортотропным, что позволяет получить замкнутое решение задачи оптимизации и упростить его структуру. Игнорируем эффект Баушингера при немонотонной деформации заготовки перед входом в роликовый калибр ввиду незначительности деформаций полок; свободное положение заготовки перед входом в калибр текущего перехода соответствует минимуму энергии деформирования; при выходе из калибра кромки заготовки могут иметь отклонения относительно направления профилирования, так что требуется введение дополнительного условия для решения задачи оптимизации;

– при определении *оптимальных углов подгибки* считаем, что напряжение по толщине полки незначительно; продольные деформации имеют линейный закон распределения; показатели схем напряженного и деформированного состояния совпадают;

– при изучении *влияния углов захода захода и выхода профиля* считаем, что кромки подгибаемой полки принадлежат некоторой цилиндрической поверхности, а деформации полки в направлении ее ширины пренебрежимо малы; материал считается несжимаемым; расстояние между парами формообразующих роликов превосходит протяженность зоны свободного формообразования;

– при формулировке *условий возникновения кромковой волнистости* считаем, что выполняется условие несжимаемости; справедлив закон степенного упрочнения; участок полки, подверженный потере устойчивости, рассматривается как пластина с жестко защемленным одним краем и свободным другим;

– при рассмотрении *прогибов донной части профиля* допущения будут приведены в соответствующем разделе.

Приведенные выше допущения не исчерпывают всего спектра ограничений, свойственных той или иной решаемой задаче. При введении дополнительных ограничений в соответствующих местах будут даваться надлежащие обоснования.

3.2. Модели уголковой зоны при интенсивном формообразовании

Интенсивное формообразование профиля в роликах предусматривает, как правило, приложение нормальных сжимающих сил к торцу заготовки для формовки угловых зон профиля. В методе интенсивного деформирования величина сжимающей силы невелика и служит преимущественно для некоторого снижения уровня деформаций растяжения наружного контура и предотвращения утонения заготовки. В методе стесненного изгиба торцевое сжатие существенно больше и его предназначение состоит в создании утолщения в угловой зоне и уменьшении допустимого радиусагиба. Поэтому достаточно рассмотреть процесс формирования угловой зоны только при стесненном изгибе, а для метода

интенсивного деформирования можно использовать те же модели, но с характерными для него значениями факторов процесса деформирования.

При разработке технологии и оборудования для изготовления профилей стесненным изгибом необходимо знание напряженно-деформированного со-

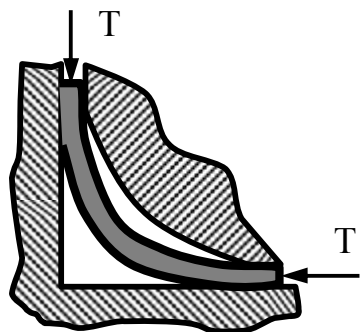


Рис. 3.1. Схема формовки угловой зоны с высвобождением по наружному контуру

стояния в зоне сгиба, позволяющее сделать последующий переход непосредственно к технологическим параметрам процесса. Для этого были использованы три метода определения напряжений в зоне сгиба: метод прямого интегрирования уравнений равновесия с использованием гипотезы ортогональности [350], метод линий скольжения [351] и метод конечных элементов [352], что было связано с необходимостью сравнения результатов при различных подходах.

Рассматривается конфигурация калибра с внешним высвобождением (рис. 3.1); при этом исключается действие аксиальных сил (чистая схема стесненного изгиба). Для определения напряженного

состояния требуется задание граничных условий, которые существенно отличаются от граничных условий при чистом изгибе [132]. Проблема состоит в определении формы контуров зоны сгиба.

3.2.1. Граничные условия задачи формирования угловой зоны

Наличие торцевого сжатия, неравномерность движения материальных частиц, неравномерность упрочнения и свободное перемещение заготовки в радиальном направлении приводят к некоторой нерегулярности контуров зоны сгиба. Отклонение форм контуров зон сгиба от дуг окружностей наблюдалось на первых образцах профилей для летательных аппаратов, переданных на испытания в ЦАГИ и для исследования в ВИАМ. Непосредственное измерение этих контуров сталкивается с затруднениями ввиду малых размеров зоны сгиба, в то время как задача состояла в удовлетворительной аппроксимации контуров с помощью известных кривых второго порядка. При этом возникала проблема регуляризации контуров зон сгиба.

Гиперболическая аппроксимация [353].

Рассмотрим случай гибки на углы 72° и 90° (как наиболее часто используемые) с учетом изменения характеристик контуров зоны сгиба в зависимости от ширины заготовки, основываясь на экспериментальных данных формообразования уголка 40×15 мм. Использовали трапециевидные заготовки (рис. 3.2) толщиной 1,1 мм, длиной 700 мм, шириной малого основания 55 мм, а ширина большого основания варьировалась в пределах от 58 до 62 мм в зависимости от предела текучести материала. Использовали материал Д16ч в трех различных состояниях (исходном, закаленном, состаренном) с пределом текучести от 220 до 450 МПа. Готовые профили разрезали на 14 равных частей и для каждого среза изготавливали шлиф. Затем зону сгиба с каждого шлифа калькировали в

большом масштабе с помощью микроскопа МИМ-7 и эпидиаскопа ЭПД-455, а затем уже проводили обработку результатов эксперимента.

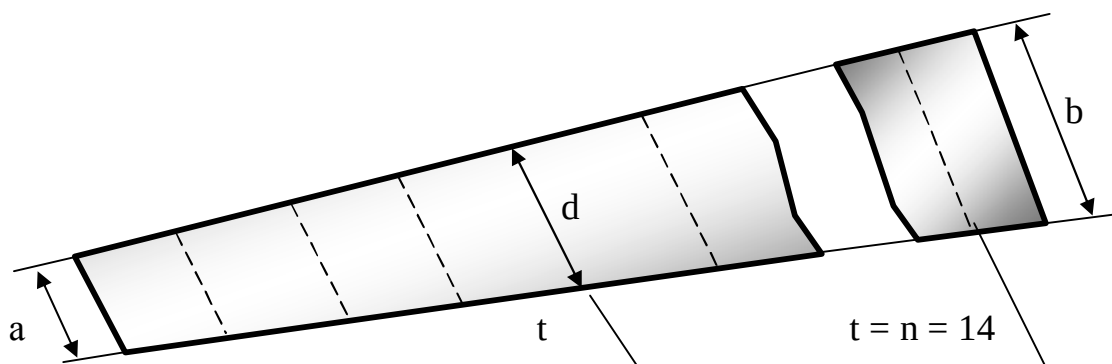


Рис. 3.2. Заготовка и места разрезки будущего профиля под шлифы

В канонической форме уравнение гиперболы имеет вид:

$$\frac{x^2}{A^2} - \frac{y^2}{B^2} - 1 = 0, \quad (3.1)$$

где x, y – текущие координаты; A, B – параметры гиперболы.

После построения асимптотики изменения параметров гиперболы [354], последние представлялись графической зависимостью от ширины заготовки. Оказалось, что графическая зависимость хорошо описывается кривой третьего порядка, которая в декартовых координатах дается формулой (локон Аньези) [355]:

$$\eta \cdot \xi^2 = \mu^2 \cdot (\mu - \eta), \quad (3.2)$$

где η, ξ – декартовы координаты (обобщенный параметр гиперболы и ширина заготовки); μ – характеристический параметр локона.

Параметры гиперболы A и B представляются в аддитивной форме: в качестве базы берется некая постоянная составляющая, которая может быть интерпретирована как сдвиг значений функции вдоль оси параметра с целью выделения в «чистом виде» другой составляющей, выражаемой локонем Аньези.

С другой стороны, оказывается необходимым производить калибровку аргумента аппроксимирующей функции, поскольку при больших значениях характеристического параметра локона вторая аддитивная составляющая становится чувствительной к малым изменениям значений аргумента и, следовательно, уменьшается точность аппроксимации.

С целью упрощения поиска значений калибрующего множителя можно ввести приведенное значение аргумента τ , которое при выборе его наибольшего значения равным пяти (соответствие условиям калибровки), связано с текущим номером шлифа t очевидным соотношением:

$$n \cdot \tau = 5 \cdot t, \quad (3.3)$$

где n – общее число шлифов.

При этом ширина заготовки d и номер шлифа t связаны посредством формулы (см. рис. 3.2):

$$n \cdot d = a \cdot (n - t) + b \cdot t, \quad (3.4)$$

где a, b – начальная и конечная ширина заготовки соответственно. Тогда калибрующий множитель с точностью до 3 - 4 % можно полагать равным $\sqrt{\mu/3}$.

Возвратимся теперь к определению характеристического параметра локна Аньези. Введем предварительно обозначения параметров гиперболы: для внутреннего контура $A = A_{11}, B = B_{12}$; для внешнего контура $A = A_{21}, B = B_{22}$.

На графике зависимости величин параметров гипербол A_{ij} от приведенного номера шлифа замеряется максимальное значение параметра и его значение при $\tau = 5$. В качестве базы берется значение параметра при $\tau = 5$, а μ_{ij} находят как разность максимального значения параметра и его значения при $\tau = 5$. Такая методика определения параметра μ_{ij} допускает максимальную погрешность 3,5%. С целью компенсации ошибки можно вводить трехпроцентную поправку в сторону уменьшения базы.

С учетом предложения об аддитивности и выражения (3.2), параметр гиперболы A_{ij} запишется в виде:

$$A_{ij} = A_{ij}^0 + \frac{\mu_{ij}^3}{\mu_{ij}^2 + [K_{ij}(t - t_m)]^2}, \quad (3.5)$$

где A_{ij}^0 – база; K_{ij} – калибрующий множитель; t_m – номер шлифа, соответствующий максимальному значению параметра гиперболы.

С использованием приведенного аргумента (3.3) соотношение (3.5) значительно упрощается:

$$A_{ij} = A_{ij}^0 + 3\mu_{ij}/(3 + \tau^2).$$

Здесь связь τ с шириной заготовки выявляется из формул (3.2) и (3.4).

Для закаленного материала Д16ч при увеличении изображения зоны сгиба в 150 раз значения параметров гипербол приводятся в табл. 3.1:

Таблица 3.1

Значения параметров гипербол

i	j	A_{ij} , мм	μ_{ij} , мм	K_{ij} , мм
1	1	70	14	8
1	2	101	30	17
2	1	52	20	12
2	2	64	80	23

Уравнение (3.1) с учетом (3.5) и при замене $x = x_{11}, y = x_{12}$ для внутреннего контура, и $x = x_{21}, y = x_{22}$ для внешнего контура, может быть переписано в следующей форме:

$$\sum_{j=1}^2 (-1)^{j+1} \frac{x_{ij}^2}{\left\{ A_{ij}^0 + \frac{m_{ij}^3}{m_{ij}^2 + [K_{ij}(t - t_m)]^2} \right\}^2} = 1. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) полностью определяет форму внутреннего и внешнего контуров в зависимости от ширины исходной заготовки, будучи эволюционной, поскольку, зная производительность станка, параметр t легко может быть связан со временем.

Сделаем теперь замечание относительно асимптотики. Угол наклона асимптот α_i определяется выражением:

$$\alpha_i = \pm \arctg A_{i1}/A_{i2}.$$

Например, для закаленного материала Д16ч при суммарном угле подгибки 72° с увеличением силы поджатия угол между асимптотами ($2 \cdot |\alpha_i|$) монотонно уменьшался для внутреннего контура со 125° до 96° ; для внешнего – со 142° до 104° . Отсюда видно, что приближение асимптот к прямолинейным участкам профиля имеет место лишь при больших силах сжатия.

Рассмотрим теперь вопрос о кривизне контуров зоны сгиба. Как известно [355], радиус кривизны гиперболы дается формулой:

$$R_i = (A_{i1}A_{i2})^2 \sum_{j=1}^2 \frac{x_{ij}^2}{A_{ij}^4}. \quad (3.7)$$

Анализ формулы (3.7) при подстановке в нее значений A_{ij} при $x_{i2} = 0$ показывает, что кривизна внешнего контура монотонно увеличивается с ростом сжимающих усилий, а кривизна внутреннего контура сначала увеличивается до некоторого значения, а затем относительно стабилизируется. Процесс стабилизации сопровождается разрушением внутреннего контура в противоположность обычной гибке, где разрушается внешний контур зоны сгиба [132].

Преимуществом данного вида аппроксимации является то, что для любой ширины заготовки (или избытка ширины заготовки) можно определить конфигурацию зон сгиба профиля. Это дает возможность выхода и на технологические параметры процесса, что было использовано при разработке системы САПР роликовой оснастки на платформе ACAD-12, которая эксплуатировалась в одной из проектных организаций г. Ульяновска в 1993 – 1997 гг. [356, 357].

К недостаткам этого вида аппроксимации относится то, что при регуляризации контуров зоны сгиба за счет технологических приемов отсутствует возможность получения окружностей в качестве контуров зоны сгиба как частного случая уравнений, полученных аппроксимацией (если только не производить реверсирование знака в уравнениях (3.1) и (3.6)). Кроме того, приходится использовать два отдельных уравнения, не связанных величиной утолщения угловой зоны по биссектрисе угла. Наконец, расчетные процедуры также требуют некоторых усилий для осознания взаимосвязей параметров и производства вычислений. Указанные недостатки можно преодолеть переходом к эллиптической аппроксимации контуров зоны сгиба.

Эллиптическая аппроксимация [358].

В работе [350] на основе постановочных экспериментов было предложено описывать контуры свободного формоизменения дугами эллипсов с различным эксцентриситетом. При этом исходили из того, что контуры свободного формообразования можно удовлетворительно аппроксимировать кривыми второго порядка. Как известно, кривые второго порядка описывается уравнением [359]:

$$a \cdot x^2 + 2 \cdot b \cdot x \cdot y + c \cdot y^2 + 2 \cdot d \cdot x + 2 \cdot e \cdot y + f = 0, \quad (3.8)$$

где x, y – декартовы координаты.

Чтобы определить тип кривой, уравнение (3.8) должно быть приведено к канонической форме посредством уничтожения линейных членов (трансляции системы координат) и смешанного члена (вращение системы координат). Однако, ввиду того, что коэффициенты в уравнении (3.8) неизвестны, то предварительно нужно задать по крайней мере пять значений координат и решить алгебраическую систему уравнений с пятью неизвестными. Экспериментальными данными служили те же результаты, что были использованы при гиперболической аппроксимации.

Приведение уравнения (3.8) к канонической форме позволяет получить значения характеристических параметров, которые для всех этапов деформирования оказались положительными, что подтверждает предположение об эллиптической форме контуров свободного формоизменения.

Практически мы исключили из рассмотрения случай параболической аппроксимации. Это связано с малой вероятностью удовлетворения условиям, определяющим параболу, которые предъявляются к инвариантам кривой второго порядка при вычислении коэффициентов на основе эмпирических значений координат:

$$I_1 = \begin{vmatrix} a & b & c \\ b & c & e \\ d & e & f \end{vmatrix}; \quad I_2 = \begin{vmatrix} a & b \\ b & c \end{vmatrix} = 0,$$

где I_1, I_2 – первый и второй инварианты соответственно.

После приведения уравнения к канонической форме вычислялись значения функции $K(a, h, h_f)$, смысл которой тот же, что и в работе [350]: это отношение полуосей аппроксимирующего эллипса. Иначе говоря, данный параметр-функция характеризует степень вытянутости эллипса в зависимости от угла подгибки, величины утолщения и свойств материала. Для расчетов использовали программу на языке «Бейсик», алгоритм которой приведен на рис. 3.3.

Результаты расчетов показали, что величина K зависит весьма слабо от угла подгибки для внутреннего контура, в то время как для внешнего контура зависимость ее от угла подгибки является существенной.

Из физических соображений ясно, что при утолщении равном единице K должно быть равно также единице. Как и в работе [350], за

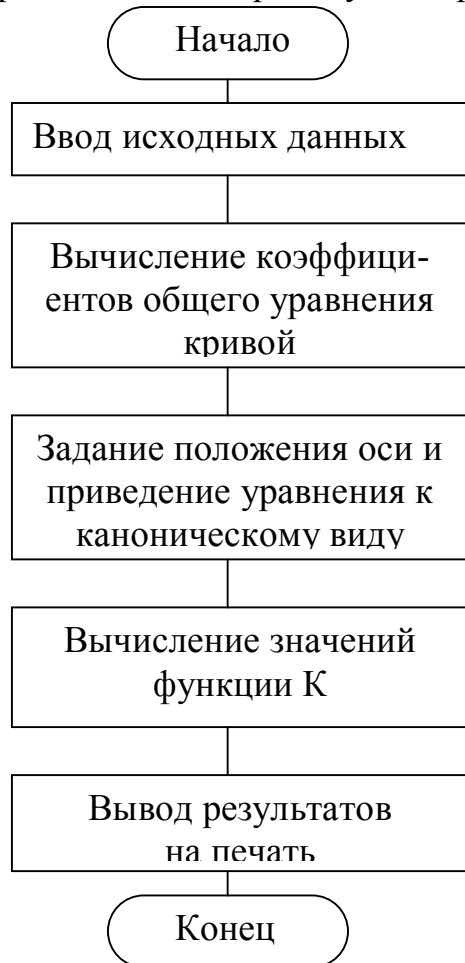


Рис. 3.3. Укрупненный алгоритм вычисления значений функции $K(\eta, \alpha)$

утолщение принимается величина:

$$h_f = S/S_0,$$

где S – толщина зоны сгиба по биссектрисе угла; S_0 – толщина заготовки.

На рис. 3.4 представлен график полученной функции $K(a, h, h_f)$:

$$K(a, h, h_f) = \sqrt{\frac{h_f - h \cos a}{h_f^2 - h \cos a}} \cdot \left[1 + \ln(h_f + h)^{\frac{h-h_f}{h_f}} \right], \quad (3.9)$$

где h – текущая относительная координата, отсчитываемая от внутреннего контура по биссектрисе угла; a – половина внутреннего угла.

Исходя из выражения (3.9), внутренний и внешний контуры могут быть описаны с помощью формул:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2 h_1}{A^2 [1 - \ln h_1]^2} = 1; \quad (3.10)$$

$$\frac{x^2}{B^2} + \frac{y^2 (h_1 - \cos a)}{B^2 (1 - \cos a)} = 1. \quad (3.11)$$

Здесь A и B суть характеристические параметры эллипса.

Уравнения (3.10) и (3.11) позволяют формулировать условия на границе как при аналитическом решении задач пластического деформирования, так и при использовании численных методов, например, метода конечных элементов. При этом ошибка в описании границ, как было проверено расчетами, не превосходит (3 – 5) %.

На рис.3.4 приведен график функции (3.9), построенный для $a = p/2$ в зависимости от утолщения η_f . Он дает представление об отклонении формы контуров зоны сгиба от формы окружностей. Например, в отсутствие утолщения (рис. 3.4, кривая 1) отношения полуосей для внутреннего контура ($\eta = 0$) и для

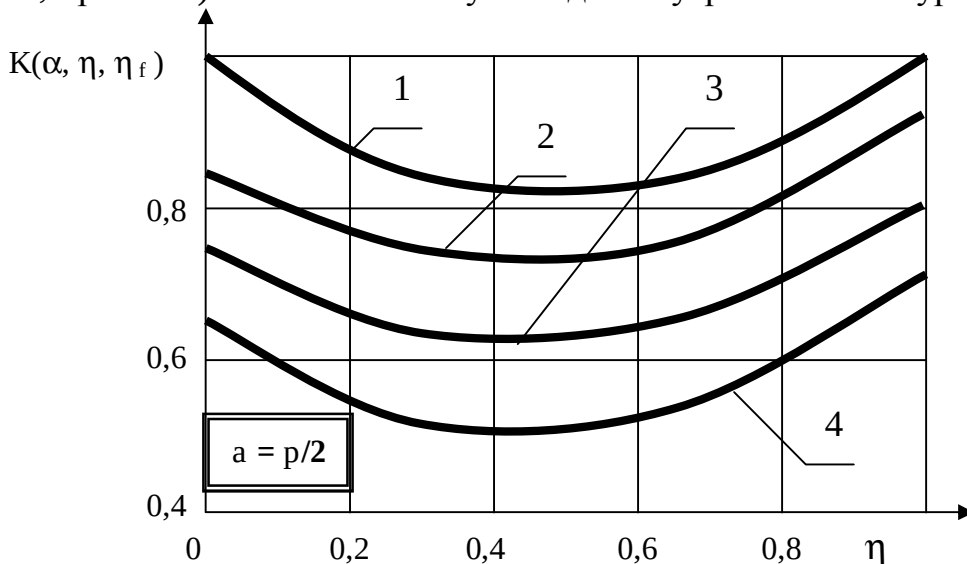


Рис. 3.4. График изменения функции $K(\alpha, \eta, \eta_f)$:
1, 2, 3, 4 – $\eta_f = 1,0; 1,1; 1,2; 1,3$ соответственно

наружного контура ($\eta = 1$) равны единице, как и при обычной гибке. По мере увеличения утолщения (кривые 2, 3, 4) контуры становятся эллиптическими, причем с различным эксцентриситетом.

3.2.2. Метод прямого интегрирования в приложении к задаче формирования угловой зоны

При использовании метода прямого интегрирования [350] введем необходимые геометрические характеристики зоны сгиба (рис.3.5.): обозначим уголгиба 2α , начальную толщину заготовки S_0 , толщину по биссектрисе угла S . Выберем декартовы координатные оси следующим образом: ось y направим по биссектрисе угла, а ось x перпендикулярно ей и осигиба, причем начало координат расположим на срединной поверхности. В выбранной таким образом системе координат границы угловой зоны определяются уравнениями (3.10), (3.11) с функцией, определяющей форму эллипса (3.9).

Отметим еще один способ определения значений функции (3.9). Если на поверхности зоны сгиба взять две произвольные точки (x_{i1}, y_{i1}) и (x_{i2}, y_{i2}) и подставить их в уравнение эллипса, то после решения соответствующей системы алгебраических уравнений можно получить значения полуосей эллипса, а затем, взяв их отношение, получить соответствующее значение $K(\alpha, \eta, \eta_f)$ в виде:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2(y_{i1} \cdot x_{i2}^2 - y_{i2} \cdot x_{i1}^2)}{\sqrt{y_{i1}y_{i2}(y_{i1} - y_{i2})(y_{i1}x_{i2}^2 - y_{i2}x_{i1}^2)}}.$$

Здесь n – число парных точек эллипса, взятых с целью минимизации ошибок.

Функция $K(\alpha, \eta, \eta_f)$ является единой как для описания внутреннего, так и наружного контуров. Однако при этом необходимо записывать два уравнения, поскольку процедура отыскания функции делает эти уравнения неинвариантными по отношению к выбору системы координат, в связи с чем кажущаяся возможность записи единого уравнения с эволюционным параметром η не может быть реализована [358]. Адекватность описания может соблюдаться при единой записи граничных условий лишь в случае одновременных трансляции координат и изменении характеристических параметров:

$$\frac{x^2}{K^2} + y^2 = (B + h)^2, \quad (3.12)$$

где B – большая полуось аппроксимирующего эллипса.

Здесь h преобразуется к координате y с помощью выражения:

$$y = 2 \frac{h - h_f}{h_f} + 1.$$

Таким образом, уравнение (3.12) позволяет задавать границы контуров как при аналитическом решении, так и при использовании численных методов в случаях свободного формообразования зоны сгиба (в отсутствие радиальных сил).

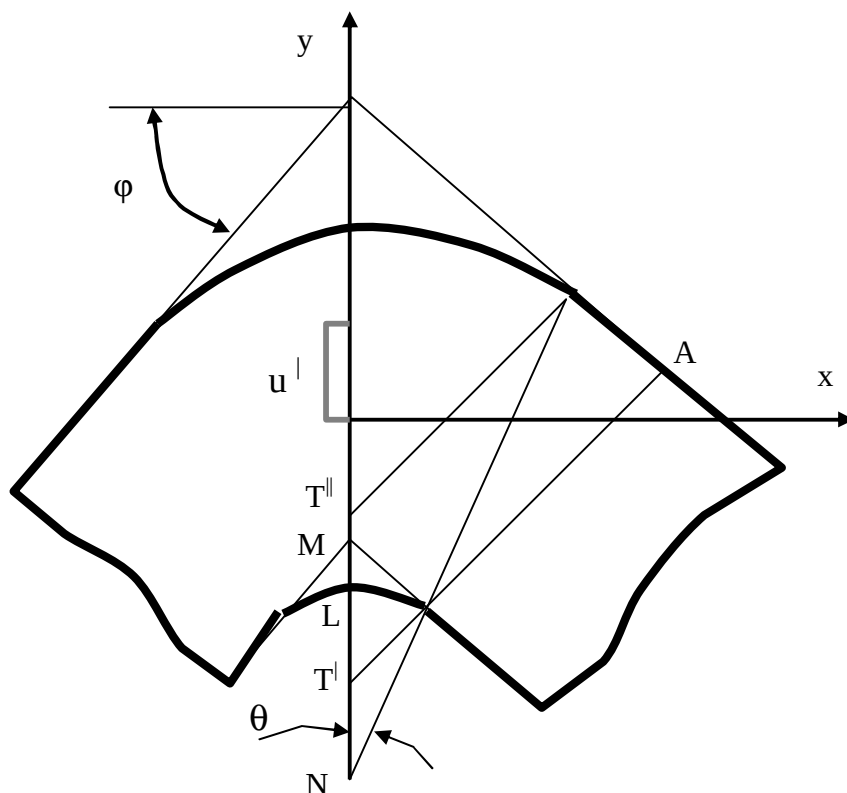


Рис. 3.5. Геометрические характеристики зоны сгиба

В соответствии с рис. 3.5, уравнение эллипса, отсекающего на оси Y отрезок u , может быть записано в следующем виде [350]:

$$x = K(a, h, h_f) \cdot \left[\frac{B_1 + B_2}{2} + \frac{B_2 - B_1}{h_f S_0} u' \right] \cdot \cos q, \quad (3.13)$$

$$y = \frac{B_1 + B_2}{2} + \left[\frac{B_1 + B_2}{2} + \frac{B_2 - B_1}{h_f S_0} u' \right] \cdot \sin q, \quad (3.14)$$

где B_1, B_2 – значения больших полуосей эллипсов, соответствующих внутреннему и наружному контурам; θ – текущий угол.

Семейство линий, ортогональных к эллипсам (3.13), (3.14), находится с использованием методов дифференциальной геометрии:

$$(K^2(a, h, h_f) - 1) \ln |l + u| = (1 - K^2(a, h, h_f)) \ln |\cos q| + \ln \left| \frac{tg q}{u} \right|, \quad (3.15)$$

где v – постоянная интегрирования.

В уравнении (3.15) введены обозначения: $u = \frac{2u'}{h_f S_0}$, $l = \frac{B_1 + B_2}{B_2 - B_1}$.

Исходя из предположения, что упругая и пластическая зоны разделяются в сечении прямой, после решения соответствующих алгебраических уравнений в работе [350], найдено соотношение:

$$q_0 = \operatorname{arctg} \left[2 \operatorname{tg} a \frac{1 - h_f \cos a}{2 h_f \cos a - 1} \right], \quad (3.16)$$

где q_0 – угол, под которым прямая, разделяющая упругую и пластическую области, пересекает ось абсцисс.

Тогда уравнение линий, перпендикулярных к семейству эллипсов (3.13) и (3.14), с учетом (3.16) в пределах пластической зоны можно записать так:

$$\operatorname{tg} q = u(l + u)^{K^2 - 1}, \quad (3.17)$$

Применяя известные тригонометрические соотношения к (3.17), перепишем соотношения (3.13) и (3.14) в виде:

$$x = \frac{Kx(l + u)}{\sqrt{1 + u^2(l + u)^{K^2 - 1}}}, \quad (3.18)$$

$$y = \frac{x[l + u(l + u)^{K^2}]}{\sqrt{1 + u^2(l + u)^{2(K^2 + 1)}}}, \quad (3.19)$$

где $x = \frac{S_0 h_f}{2}.$

Принимая во внимание соотношения (3.18) и (3.19), можно вычислить коэффициенты Ламе для ортогональной сетки. Запишем выражение только для одного из них, а именно H_u , ибо только оно нам потребуется в дальнейшем:

$$H_u = \sqrt{\frac{K^2 x^2 u^2 (l + u)^{4K^2 - 2} + x^2 (l + u)^{2K^2} \left[1 + 2u^2 (l + u)^{4K^2 - 2} \right]}{\left[1 + u^2 (l + u)^{2K^2 - 2} \right]^3}}. \quad (3.20)$$

В работе [350] показано, что коэффициент Ламе для направления, совпадающего с движением профиля, равен единице, а два других не зависят от координаты этого направления.

Уравнения равновесия в криволинейной системе координат [278] для угловой зоны сводятся к уравнению в частных производных [350]:

$$\frac{\partial s_v}{\partial u} - (s_u - s_v) \frac{\partial}{\partial u} \ln H_u = 0, \quad (3.21)$$

где σ_v , σ_u – главные значения напряжений вдоль соответствующих ортогональных линий.

Учитывая, что влияние гидростатического давления на изменение формы мало, представим функцию пластичности, зависящую лишь от второго инварианта тензора напряжений, в виде:

$$s_v - s_u = L_n \cdot e_i^n = \frac{K_1}{(1 - m_{13} \cdot m_{31})^{\frac{n+1}{2}}} \cdot e_i^n, \quad (3.22)$$

где L_n/K_1 , n – коэффициенты аппроксимации единой кривой; e_i – эквивалентная натуральная деформация; μ_{ij} – коэффициенты анизотропии, у которых первый индекс показывает направление действия силы, а второй – поперечного сжатия (здесь направление «1» совпадает с касательной к линии «u», направление «3» – перпендикулярно плоскости поперечного сечения профиля) [300].

В формуле (3.22) значение натуральной деформации может быть представлено в виде:

$$e_i = \ln \left(\int_0^h d \left| \frac{S}{S_0} \right| \right), \quad (3.23)$$

где выражение под знаком логарифма с точностью до мультипликативной составляющей может быть отождествлено с накопленной деформацией (параметр Удквиста).

Для раскрытия полного дифференциала в формуле (3.23) введем следующие обозначения: ds_v – элемент произвольного волокна в направлении v ; ds_v^0 – элемент срединного волокна в том же направлении; e_v – деформация произвольного волокна относительно срединного; e_v^0 – деформация срединного волокна. Тогда интеграл в формуле (3.23) может быть представлен в виде:

$$\int_0^h d \left| \frac{S}{S_0} \right| = (1 + e_v) \cdot (1 + e_v^0). \quad (3.24)$$

С другой стороны, в криволинейных координатах:

$$ds_v = H_u(v, u) dv, \quad ds_v^0 = H_u(v, 0) dv \quad (3.25)$$

вдоль дуг, определяемых значениями $u = \text{const} \neq 0$ и $u = 0$ соответственно. Тогда первый сомножитель в правой части формулы (3.24) с учетом соотношений (3.25) примет вид:

$$1 + e_v = \frac{ds_v}{ds_v^0} = \frac{H_u(v, u)}{H_u(v, 0)}. \quad (3.26)$$

В формуле (3.24) фактически эквивалентная деформация ассоциируется с величиной утолщения зоны сгиба, а также учтено условие плоской деформации. Очевидно, условие пластичности (3.22) с учетом взаимосвязи (3.26) может быть преобразовано с учетом формул (3.24), (3.26) и использовано при интегрировании уравнения (3.21) по частям, откуда:

$$s_u = -\frac{L_n}{n+1} \cdot \left[\ln \left[\frac{1 + e_v^0}{H_u(v, 0)} \cdot H_u(v, u) \right] \right]^{n+1} + G(v), \quad (3.27)$$

где $G(v)$ – некоторая функция, подлежащая определению.

В схеме со свободными от действия сил контурами зоны сгиба, удовлетворение граничным условиям решения (3.27) позволяет найти неизвестные функции e_v^0 и $G(v)$:

$$e_v^0 = \frac{H_u(v, 0)}{\sqrt{H_u(v, +1) \cdot H_u(v, -1)}} - 1; \quad (3.28)$$

$$G(v) = -\frac{L_n}{n+1} \cdot \left[\ln \sqrt{\frac{H_u(v, +1)}{H_u(v, -1)}} \right]^{n+1}. \quad (2.29)$$

Окончательно, решение (3.27) с учетом соотношений (3.28), (3.29) дает:

$$s_u = -\frac{K_1}{(n+1)(1-m_{13}m_{31})^n} \left[\left[\ln \frac{H_u(v, u)}{\sqrt{H_u(v, +1) H_u(v, -1)}} \right]^{n+1} - \left[\ln \sqrt{\frac{H_u(v, +1)}{H_u(v, -1)}} \right]^{n+1} \right], \quad (3.30)$$

где H_u определяется формулой (3.20).

Очевидно, напряжения σ_v могут быть найдены из совместного рассмотрения формул (3.22) и (3.30). Полученное решение согласуется с граничными условиями, что легко установить из формулы (3.30). Нетрудно усмотреть, что при отсутствии упрочнения ($n = 0$) это же решение по форме совпадает с известным решением классической задачи пластического изгиба [272, 360].

Формула (3.30) показывает, что распределение напряжений в зоне сгиба не зависит от анизотропии, хотя их величина зависит от нее. Этот результат хорошо согласуется с решением Ю.М. Арышенского той же задачи методом возмущений в растянутых координатах Лайтхилла [300, 281], где в качестве нулевого приближения взято решение задачи чистого изгиба, а в качестве параметра возмущения принята величина утолщения зоны сгиба, измеренная вдоль биссектрисы угла. Здесь же показано наличие сдвиговых деформаций и касательных напряжений в угловой зоне при наличии торцевого поджатия, однако решение по касательным напряжениям оказалось асимптотически не вполне корректным [171, 361]. Наличие упрочнения и учет анизотропных свойств заготовки имеют значение для определения пружинения при умеренных значениях величины торцевого поджатия (до $0,2 \sigma_T$). При этих величинах торцевого поджатия пружинение уменьшается до (30...40) % по сравнению с данными для обычной гибки [295]. Известно, что наличие упрочнения увеличивает пружинение при гибке, однако влияние упрочнения и торцевого поджатия в этом случае являются конкурирующими: торцевое поджатие уменьшает объем зоны с растягивающими аналогами окружных напряжений σ_v и как бы «гасит» приращение угла пружинения за счет упрочнения. При торцевом поджатии, соизмеримым с пределом текучести материала, картина деформирования меняется: зона растягивающих напряжений сокращается, а нейтральный слой напряжений выходит за пределы наружного контура зоны сгиба. В этом случае возникает возможность анализа напряженного состояния в угловой зоне с использованием метода линий скольжения (МЛС) [278, 132]. Конечно, здесь упрочнение не может быть учтено вследствие ограничений данного метода [362].

Отметим, что применение МЛС было бы неправомерно для анализа гибки моментом, когда справедлива гипотеза плоских сечений и отсутствуют деформации сдвига. На возможность использования МЛС в задачах гибки со значительным торцевым поджатием и весьма большой кривизной внутреннего контура зоны сгиба указывает анализ работ [89, 106] и особенно работы [363].

3.2.2. Метод линий скольжения в приложении к определению напряжений в угловой зоне

При использовании метода линий скольжения [362] в качестве линий скольжения, ортогональных семейству эллипсов, брали семейство логарифмических спиралей [351]:

$$r = Ae^{\gamma/m}, \quad (3.31)$$

где r – радиус-вектор; A – константа; γ – угол между направлением одного из главных напряжений и биссектрисой угла; m – функция, зависящая от характеристик эллипсов и угла, образованного радиус-вектором спирали и биссектрисой.

Так как линии скольжения пересекаются под углом $\pi/4$, то из рис. 3.6, следует:

$$\theta_2 - \theta_1 = \pi/4, \quad (3.32)$$

где θ_1 и θ_2 – углы, под которыми эллипс и спираль пересекают радиус-вектор.

Указанные углы определяются формулами:

$$q_1 = \arctg \frac{1}{m}, \quad q_2 = \arctg \left(\frac{1 + e \cdot \cos j}{e \cdot \sin j} \right), \quad (3.33)$$

где e – эксцентриситет эллипса; φ – полярный угол.

Учитывая связь эксцентриситета и коэффициента отношения полуосей эллипса, из формул (3.32) и (3.33) получим:

$$m = \frac{\left(1 + \sqrt{1 - K^2}\right) \cdot (\sin j + \cos j)}{\left(1 + \sqrt{1 - K^2}\right) \cdot (\sin j - \cos j)}. \quad (3.34)$$

Здесь K , как и ранее, определяется формулой (3.9).

Тогда, используя уравнения характеристик и условие пластичности (уравнения Генке [132]), после удовлетворения граничным условиям, получаем формулу для определения тангенциальных напряжений, например, в растянутой зоне [351]:

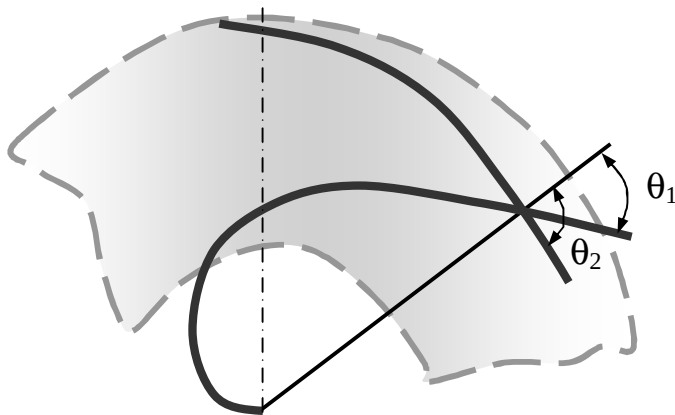


Рис. 3.6. Линии скольжения и характеристики

$$s_v = \frac{2s_T}{m\sqrt{3}} \ln \left[\frac{K^2(B + S_0 h)(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f) \cos j})}{K^2(a, h, h_f)(B + S_0 h_f)(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f) \cos j})} \right]. \quad (3.35)$$

Здесь m определено формулой (3.34), а σ_T – предел текучести материала.

Для сжатой зоны следует внести соответствующие изменения в условие пластичности. Значения σ_u для растянутой и сжатой зон легко определяются из соответствующих условий пластичности. Положение нейтрального слоя находится из трансцендентного уравнения, являющегося следствием сшивания напряжений для растянутой и сжатой зон:

$$\frac{(B + S_0 h)K^2}{1 + \sqrt{1 - K^2}} = \left\{ B(B + S_0 h_f) / \left[(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f)}) (1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f)}) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (3.36)$$

Очевидно, обычная гибка должна быть частным случаем стесненного изгиба. Именно, при отсутствии торцевого сжатия контуры зоны сгиба имеют форму окружностей, что следует из формул (3.10 – 3.11), а формулы (3.35) и (3.36) переходят в известные формулы обычной гибки [364].

На рис. 3.7 и 3.8 представлена составная номограмма распределения напряжений s_v в зоне сгиба для $h_f = 1,2$. Приведенное значение $\bar{s}_v = s_v / s_T$ зависит параметрически от относительного значения большой полуоси $\bar{B} = B/S_0$, половины угла гибки α , а также от координат η и φ . Введены следующие обозначения:

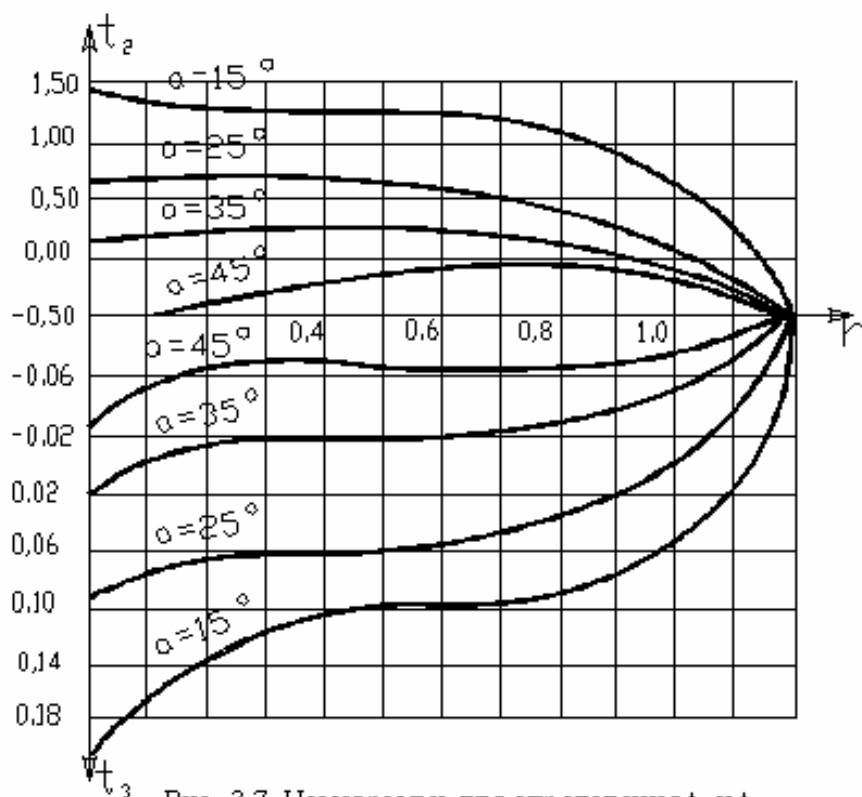


Рис. 3.7. Номограмма для определения t_3 и t_2

$$t_1 = \frac{\bar{B} + h}{\bar{B} + h_f}, \quad t_2 = 2 \ln \frac{K(a, h, h_f)}{K(a, h, h_f)},$$

$$t_3 = \ln[(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f) - 1 \cos j}) / (1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f) \cos j})],$$

$$S = 2 / (m\sqrt{3}), \quad t = t_1 + t_2 + t_3, \quad s_v = t \cdot S.$$

Значение σ_u для заданных координат φ и η легко определяется из условия пластичности и номограммы рис. 3.8. Аналогичные диаграммы могут быть построены и для других значений утолщения, не превосходящих 1,4. В соответствии с номограммой, напряжение может менять знак, из чего можно заключить, что с малыми силами поджатия на первых этапах деформирования происходит движение материала с поверхностных слоев внутреннего контура к линии биссектрисы угла, обжимающее продольное (радиальное) волокно и заставляющее его вытягиваться, в то время как часть продольного волокна, находящегося между внешним контуром и нейтральным слоем, испытывает сокращение (хотя и меньшее, чем при обычной гибке).

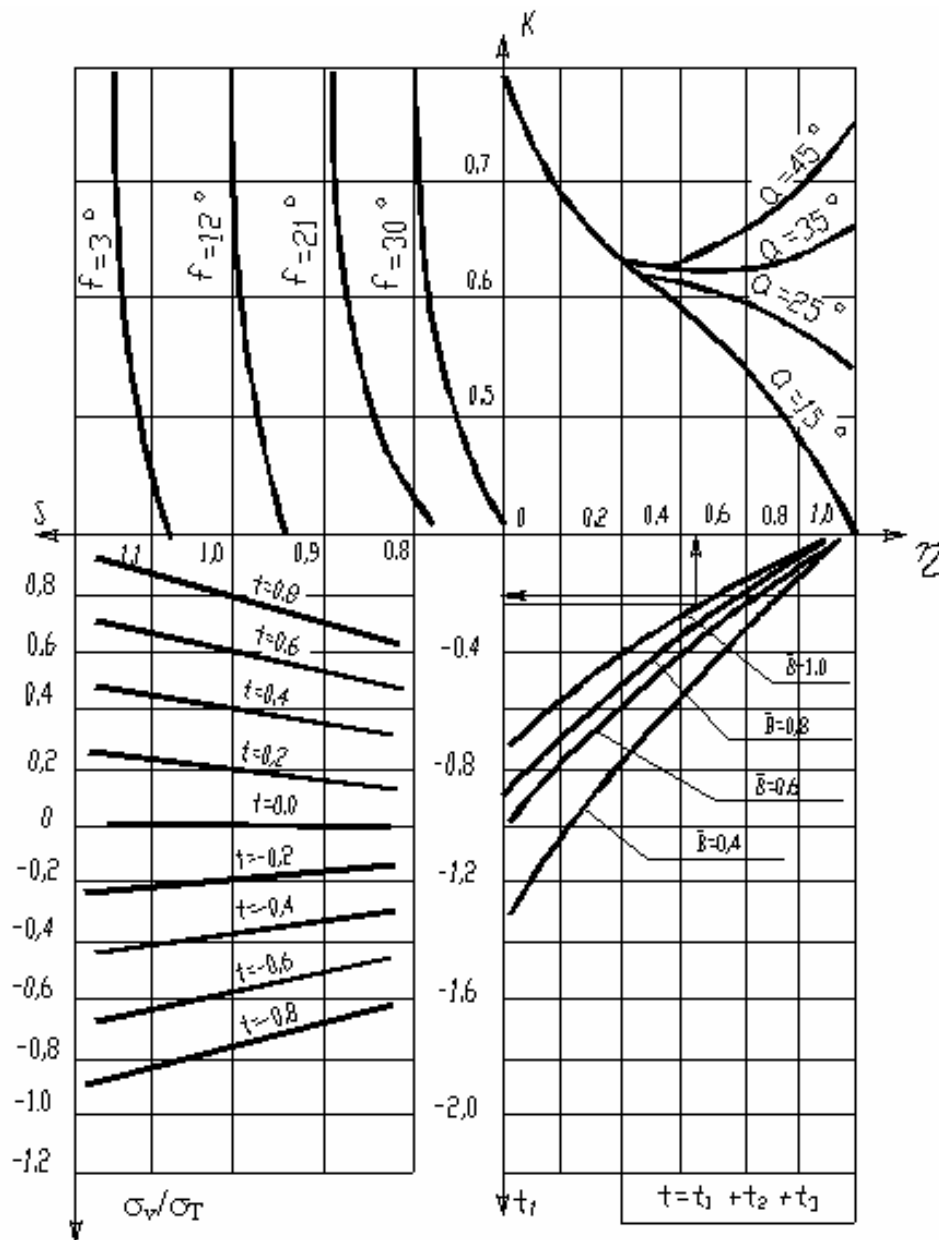


Рис. 3.8. Номограмма для определения σ_v

Дальнейшее увеличение силы поджатия приводит к стабилизации кривизны внутреннего контура, сопровождаемой образованием микроскладок и микротрещин, что обусловлено исчерпанием запаса пластичности материала и последующим его разрушением, что в действительности и имеет место при больших силах поджатия. Однако описание процесса разрушения не может быть дано моделями, основанными на условиях сплошности (неразрывности) среды.

3.3. Зоны деформирования заготовки в межклетьевом пространстве

В межклетьевом пространстве (рис. 3.9) заготовка может быть разделена на ряд зон: зону стабилизации (поперечное сечение заготовки повторяет конфигурацию роликового калибра предшествующего перехода), зону (участок) плавного перехода, контактную зону [201, 344]. Каждая из указанных зон оказывает определенное влияние на процесс формообразования профиля, при этом зона плавного перехода, точнее ее протяженность, является определяющей.

3.3.1. Протяженность зоны плавного перехода

Протяженность зоны плавного перехода (ЗПП) связана с деформационными характеристиками подгибаемых полок и зависит как от геометрических параметров изготавливаемого профиля, режимов подгибки, так и от характеристик применяемого оборудования [201, 277, 365, 336]. Влияние двух последних на показатели процесса формообразования представлено в табл. 3.2 [336].

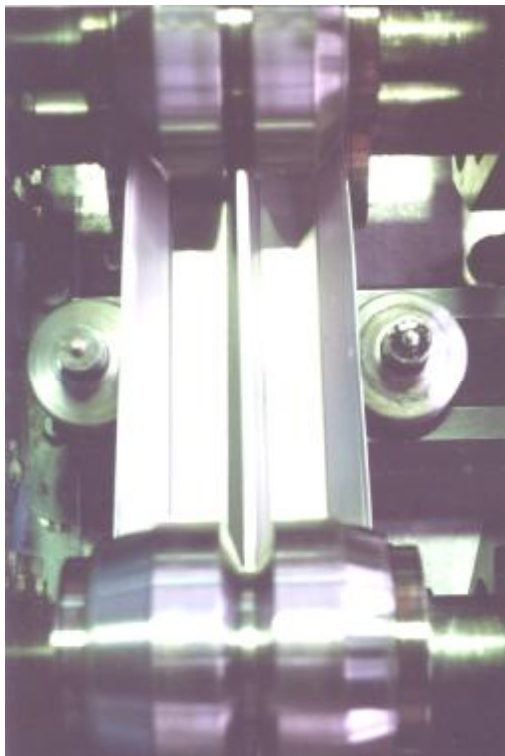


Рис. 3.9. Межклетьевое пространство профилегибочного стана с межклетьевой проводкой

Как показывает табл. 3.2, для оптимизации процесса формообразования профиля необходимо разработать модель ЗПП и на этой основе сформулировать соответствующие требования к ведению процесса формообразования и межклетьевому расстоянию профилегибочного станка. Отметим, что одна и та же модель может использоваться для СИ и МИД. Разработанная ранее модель протяженности зоны плавного перехода для СИ [314] не включала влияние анизотропии и соотношения диаметров формирующих роликов в отличие от новой модели [365].

Рассмотрим общий случай формообразования профиля, когда на заготовку, кроме силы подгибки со стороны роликов текущего перехода, еще действуют усилия торцевого поджатия P_t (рис. 3.10). При этом считаем, что перегиб полки перед входом в роликовый калибр не оказывает существенного влияния на механические характеристики заготовки (пренебрежение эффектом Баушингера). Указанные силовые факторы обеспечиваются вы-

бором соответствующей конфигурации роликов, соотношением их диаметров, зазоров в них и шириной заготовки при заданном межклетьевом расстоянии L_m .

Таблица 3.2.

Влияние характеристик оборудования и режимов подгибки на параметры процесса

Недостатки	Следствия
Заниженное значение межклетьевого расстояния (оборудование)	Кромковая волнистость, продольный прогиб, разрыв заготовки, переформовка заготовки, увеличенное энергопотребление оборудованием
Завышенное значение межклетьевого расстояния (оборудование)	Необоснованное увеличение габаритов и металлоемкости оборудования, необходимость дополнительных проводов, увеличенные энергозатраты
Заниженный угол подъема кромки (технология)	Увеличение числа переходов и количества оснастки, усложнение отладки и настройки оборудования
Завышенный угол подъема кромки (технология)	Кромковая волнистость, значительная продольная кривизна профиля, разрыв заготовки

Примем следующую последовательность решения поставленной задачи:

- найдем энергию деформирования заготовки и составим функционал энергии;
- произведем минимизацию функционала энергии;
- с учетом исходных допущений определим протяженность зоны плавного перехода.

Пусть в поперечном сечении заготовки механические свойства ее в направлениях x_1 и x_2 одинаковы, но отличны от тех же свойств в направлении x_3 . Тогда показатели анизотропии μ_{ij} (i – направление нормали к площадке, j – направление действия силы) удовлетворяют соотношениям [281]:

$$m_{31} = m_{32} = 1 - m_{12} = m_{21}; \quad m_{23} = m_{13} = 0.5 \quad (3.37)$$

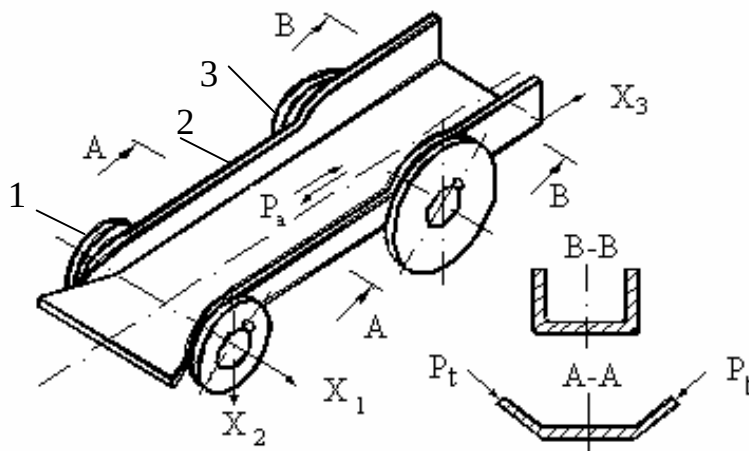


Рис. 3.10. Реализация процесса и силовые факторы при профилировании: 1 – роликовая пара предварительной подгибки; 2 – зона плавного перехода; 3 – роликовая пара окончательного формообразования

Полная энергия деформирования W , приходящаяся на единичную длину, на одном переходе вследствие свойства аддитивности энергии будет складываться из следующих компонент [365]:

$$W = W_{yz} + W_p + W_e + W_a, \quad (3.38)$$

где W_{yz} – энергия деформирования уголкового части; W_p – энергия разгибки заготовки в калибре при подсадке; W_e – энергия деформирования полки из-за подъема на последующем переходе; W_a – энергия деформирования заготовки вследствие приложения аксиальных усилий.

Энергия деформирования уголкового зоны определяется формулой:

$$W_{yz} = s_1 s^2 Q(x_3) / 4, \quad (3.39)$$

где s_1 – предел текучести материала в направлении x_1 , МПа; s – толщина исходной заготовки, мм; $Q(x_3)$ – угол подгибки заготовки, град.

Энергия разгибки полки (рис. 3.11) может быть определена по формуле [365]:

$$W_p = s_1 s^2 Q(x_3) (1 - r_1^h / r_1), \quad (3.40)$$

где r_1^h, r_1 – радиусы заготовки в зоне сгиба после подсадки и при свободном формообразовании соответственно, мм.

Для обоснования формулы (3.40) рассмотрим уголковую зону на текущем переходе (см. рис. 3.11). Если верхний ролик перехода изготовлен так, что отрезок $AB = C1$, то свободный участок заготовки длиной l_{AC} , не контактирующий с роликом, будет определяться по формуле:

$$l_{AC} = r_1 Q_1. \quad (3.41)$$

Когда развертка калибра меньше развертки заготовки на величину Δh_1 (при соблюдении условий сопряжения), происходит подсадка заготовки до радиуса r_1^h . В этом случае справедливо следующее соотношение:

$$Dh_1 = l_{AC} - r_1^h \cdot Q_1. \quad (3.42)$$

При подсадке заготовки происходит увеличение ее кривизны в уголкового части и разгибание ее с радиусом кривизны r_1 и длиной Δh_1 в соответствии с выражением (3.42). Угол Θ^P , на который происходит разгибание, определяют с учетом формул (3.41) и (3.42):

$$Q^P = Dh_1 / r_1 = Q(1 - r_1^h / r_1). \quad (3.43)$$

Подставляя в выражение, аналогичное равенству (3.39), значение Q^P из формулы (3.43), приходим к зависимости для определения энергии разгибки (3.40). Отметим, что радиусы r_1^h и r_1 являются не технологическими параметрами, а лишь текущими геометрическими параметрами, причем при $\Delta h_1 > 0$ радиус

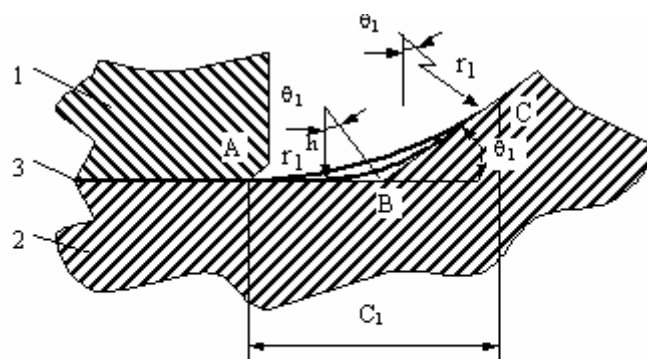


Рис. 3.11. Геометрические параметры процесса при свободной гибке и после подсадки: 1 – верхний ролик; 2 – нижний ролик; 3 – заготовка

r_1 может быть виртуальным геометрическим параметром. Ясно, что $r_1^h = r_2$ при $\Delta h_1 = 0$, когда ширина развертки калибра совпадает с шириной заготовки. Реальными технологическими параметрами являются значения C_1 , $D h_1$ и Q_1 , которые могут быть назначены технологом.

Для очередного перехода k формула (3.40) остается практически неизменной, кроме замены индексов:

$$W_p = s_1 s^2 Q(x_3) (1 - r_k^h / r_{k-1}) / 4, \quad (3.44)$$

где r_{k-1} – радиус кривизны заготовки на предшествующем переходе, мм.

На последующих переходах значения C_k , как правило, не устанавливаются, поскольку уже на первом переходе задается линия сгиба, которая в дальнейшем не подлежит переформовке. При интенсификации процесса за счет видоизменения схемы формообразования можно использовать выражение для W_p типа формулы (3.44) при задании конкретных значений для C_k . Значение параметра C_k не должно превышать критической величины, при которой наступает локальная потеря устойчивости заготовки.

Работу формообразования полки W_e можно вычислить, определив деформации вытяжки участков полки путем последующей факторизации ее с предельным эффективным напряжением. Найдем деформацию вытяжки из геометрического рассмотрения поверхности изгиба полки при подгибе ее на угол Q . Перейдем от декартовых координат к цилиндрическим:

$$x_1 = r \cos Q; \quad x_2 = r \sin Q; \quad x_3 = x_3, \quad (3.45)$$

где r — расстояние от линиигиба до заданной точки полки, мм.

Приращение радиус-вектора или дифференциал дуги dS можно определить по правилам дифференциальной геометрии с учетом формулы (3.45):

$$dS = \sqrt{(1 + r^2 (dQ / dx_3)^2)} \cdot dx_3. \quad (3.46)$$

Для вычисления продольной деформации полки e_e используем разложение в ряд Тейлора правой части формулы (3.46) с удержанием двух членов ряда и определение деформации:

$$e_e = 0,5 r^2 (dQ / dx_3)^2. \quad (3.47)$$

Энергию деформирования полки вследствие поднятия кромки, приходящуюся на единичную длину, находят путем факторизации предела текучести и продольной деформации (3.47), с последующим интегрированием произведения по ширине и толщине полки:

$$W_e = 0,5 s s_2 (dQ / dx_3)^2 \int_0^B r^2 dr = s_2 s b^3 (dQ / dx_3)^2 / 6, \quad (3.48)$$

где σ_2 – предел текучести в направлении 3, МПа.

Энергия продольной вытяжки (сжатия) учитывается для полки, в которой присутствуют пластические деформации. Факторизация эквивалентного напряжения σ_2 и продольной деформации (3.47) с учетом кинематических ха-

рактистик процесса и эффекта изменения ширины полки [365] дает удельную энергию деформирования W_a :

$$W_a = s_2 \cdot (R_k / R_{k-1} - 1) \cdot (b + r_k Q) s, \quad (3.49)$$

где R_k, R_{k-1} – радиус ролика на актуальном и предшествующем переходах, мм;
 b – ширина полки, мм.

Суммарная энергия с учетом формул (3.38), (3.39), (3.40), (3.48) и (3.49) может быть записана в виде:

$$W = s_1 s^2 \Theta(x_3) (2 - r_k^h / r_{k-1}) / 4 + \\ + s_2 \cdot s \cdot \{ (d\Theta / dx_3)^2 b^3 / 3 + (R_k / R_{k-1}) (r_k \Theta + b) \} / 2. \quad (3.50)$$

В соответствии с предположением о минимальной энергии при свободном состоянии заготовки произведем минимизацию функционала энергии ζ :

$$Z = \int_0^L W dx_3, \quad (3.51)$$

где L – длина зоны плавного перехода, мм.

Отметим, что $s_1 = \sqrt{(m_{32} / m_{21})} s_T$; $s_2 = \sqrt{(m_{13} / m_{31})} s_T$ [281], или с учетом выражения (3.37):

$$s_1 = s_T, \quad s_2 = \sqrt{0.5 / (1 - m_{12})} s_T. \quad (3.52)$$

Соотношения (3.52) надлежит учесть при использовании выражений (3.50) и (3.51). Минимизацию функционала (3.51) произведем, считая, что длина L задана так, что на первом этапе решается задача с неподвижными концами. На втором этапе длину L_k найдем из дополнительного условия через геометрические характеристики заготовки и технологической оснастки. Уравнение Эйлера – Лагранжа, полученное из условия $\delta\zeta = 0$, дает:

$$Q(x_3) = Ax_3^2 / (2B) + C_1 x_3 + C_2, \quad (3.53)$$

где C_1, C_2 – пока неопределенные константы, а величины A и B даются соотношениями: $A = s_T \cdot s^2 \cdot (2 - r_k^h / r_{k-1}) / 4 + s_T \cdot s \cdot b \cdot (R_k / R_{k-1} - 1) \cdot r_k \cdot \sqrt{0.5 / (1 - m_{12})} / 4$;
 $B = s_T \cdot s \cdot b \cdot \sqrt{0.5 / (1 - m_{12})} / 3$.

Граничные условия для решения (3.53) формулируются из исходных посылок (допущение о сопряжении):

$$Q(0) = Q_0; \quad Q(L) = Q_0 + Q_k, \quad (3.54)$$

где Q_0 – суммарный угол подгибки на предшествующем переходе, град;

Q_k – угол подгибки в текущем переходе, град.

Решение (3.53) с учетом граничных условий (3.54) дает:

$$Q(x_3) = Ax_3^2 / (2B) + Q_k / L - AL / (2B) + Q_0. \quad (3.55)$$

Для определения соотношения, связывающего $\Theta(x_3)$ с геометрическими характеристиками калибров и заготовки, используем дополнительное условие

сопряжения $\Theta(x_3)|_{0,L} = 0$, которое с формулой (3.55) и соотношениями для A и B приводит к следующей зависимости:

$$L_k = \sqrt{\frac{8 \cdot Q_k \cdot b^3}{3 \left\{ s \cdot \sqrt{2(1 - m_{12})} \cdot \left(2 - \frac{r_k^h}{r_{k-1}} \right) + b \cdot \left(\frac{R_k}{R_{k-1}} - 1 \right) \cdot r_k \right\}}}, \quad (3.56)$$

где k и $(k-1)$ – индексы текущего и предыдущего переходов соответственно; r_k – относительный радиусгиба в текущем переходе.

Здесь длина зоны плавного перехода зависит от показателей анизотропии, что реально отражает реологические свойства материала. Отсутствие зависимости ее от предела текучести объясняется тем, что модель строилась в предположении, что материал заготовки – жесткопластичный, а упругими эффектами мы пренебрегли. Этому факту соответствует жесткий выбор межклетьевого расстояния, обеспечивающего формообразование без излишней переформовки заготовки.

В формуле (3.56) при стремлении толщины заготовки к нулю протяженность зоны плавного перехода увеличивается. С физической точки зрения это обосновывается так: чем тоньше заготовка, тем большую кривизну следует ей придать для ее перевода в пластическое состояние.

Под влиянием подсадки заготовки зона плавного перехода уменьшается, так как увеличивается кривизна заготовки и пластическое состояние охватывает большую часть заготовки по сравнению с процессом обычного профилирования, когда кривизна заготовки в зоне сгиба не изменяется ($r_k^h = r_k$). Для традиционного профилирования при равных радиусах формирующих роликов ($R_k = R_{k-1}$) и изотропного материала ($\mu_{12} = 0,5$) формула (3.56) дает известную формулу Бхаттачария – Коллинза [317].

На рис. 3.12 приведены для сравнения различные модели протяженности зоны плавного перехода, построенные с помощью программы MathCAD2001Pro для заготовки толщиной 1 мм из мягкой стали. Модель Гуна Г.Я. [277] и модель Бхаттачария Д. и Коллинза И.Ф. [317] дают весьма близкие значения к предлагаемой модели, причем поведение кривых идентично. Что касается модели Тришевского И.С. и Докторова М.Е. [201], то график функции существенно отличается от графиков трех других моделей, что объясняется неточностью модели. Во-первых, сами авторы указывают, что аналитическая форма коэффициента задана «в первом приближении»; во-вторых, модель является полуэмпирической, причем, эксперименты проводились на оборудовании с большим межклетьевым расстоянием (около 1000 мм); в-третьих, модель дает зависимость протяженности зоны плавного перехода только от ширины полки, что не вполне соответствует реальному процессу формообразования. Отметим, что график по предлагаемой модели на рис. 3.12 построен без учета подсадки заготовки и зависимости протяженности зоны плавного перехода от диаметров формирующих роликов для обеспечения возможности сравнения различных моделей в идентичных условиях.

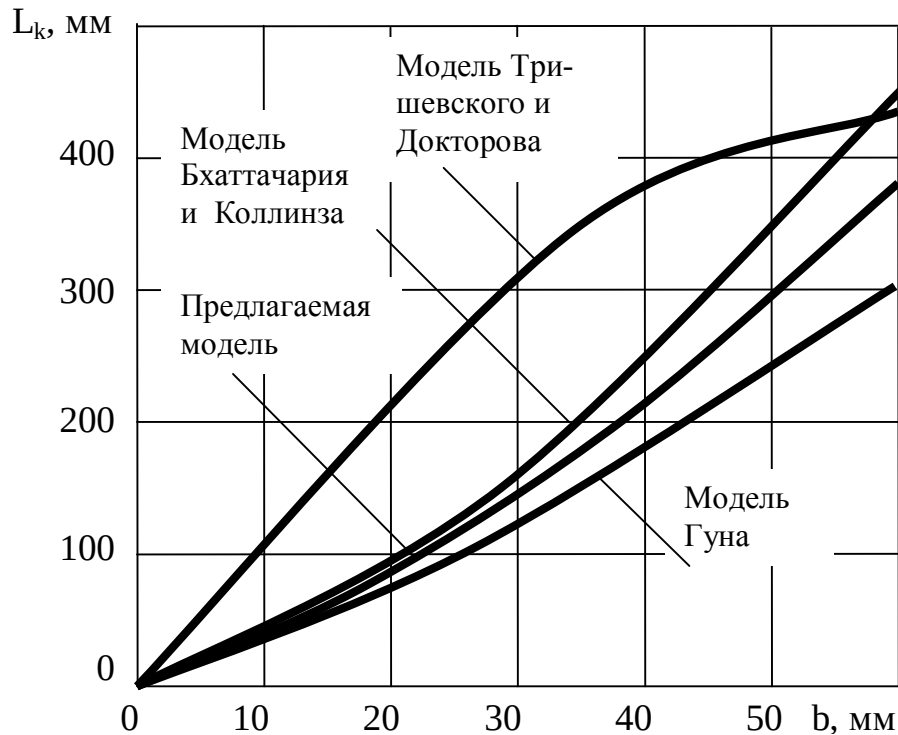


Рис. 3.12. Модели протяженности зоны плавного перехода по данным различных авторов

На рис. 3.13 представлена зависимость протяженности зоны плавного перехода от толщины заготовки и радиусагиба, показывающая уменьшение величины L_k с увеличением радиусагиба. Данная зависимость объясняется тем, что увеличение радиусагиба как бы уменьшает ширину подгибаемой полки, а кроме того, снижается общая жесткость заготовки в межкультевом пространстве и уменьшается размер области пластической деформации.

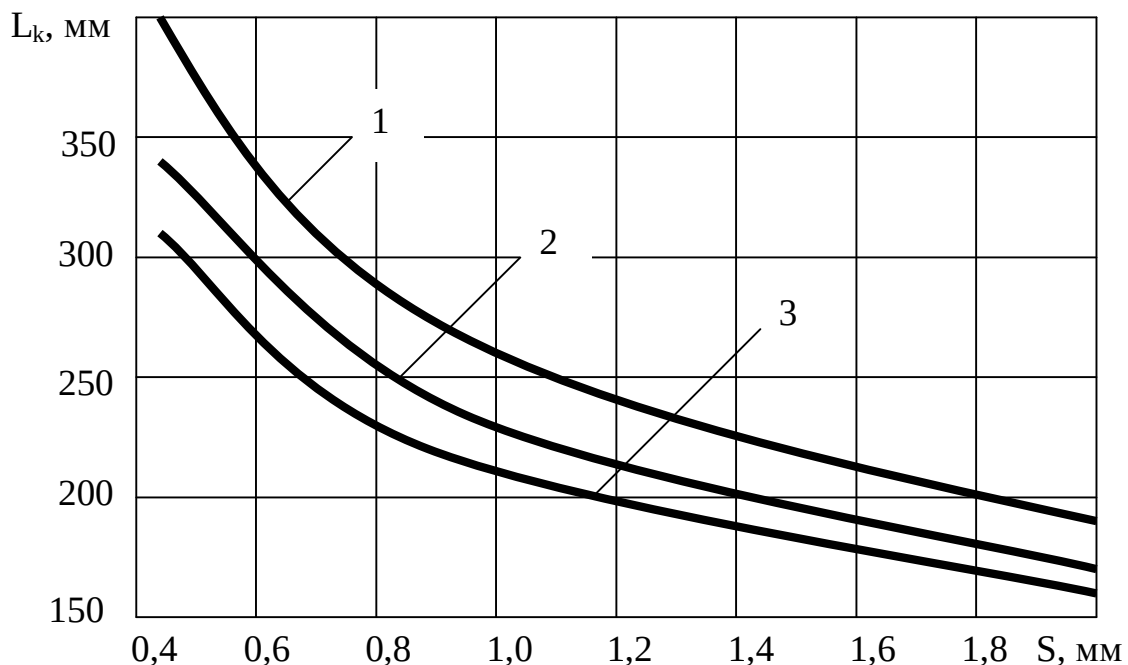


Рис. 3.13. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от толщины заготовки и радиусагиба: 1, 2, 3 – $r = 2s$, $4s$, $10s$

Рис. 3.14 иллюстрирует изменение L_k в зависимости от угла подгибки полки и уменьшения от перехода к переходу диаметров формующих роликов. Здесь уменьшение протяженности зоны плавного перехода в межклетьевом пространстве связано с изменением пространственной конфигурации заготовки, так называемым «развалом заготовки». К сожалению, модель не прогнозирует данного вида потери устойчивости периферийных элементов в зависимости от L_k , однако в разделе 3.5 эти вопросы затрагиваются.

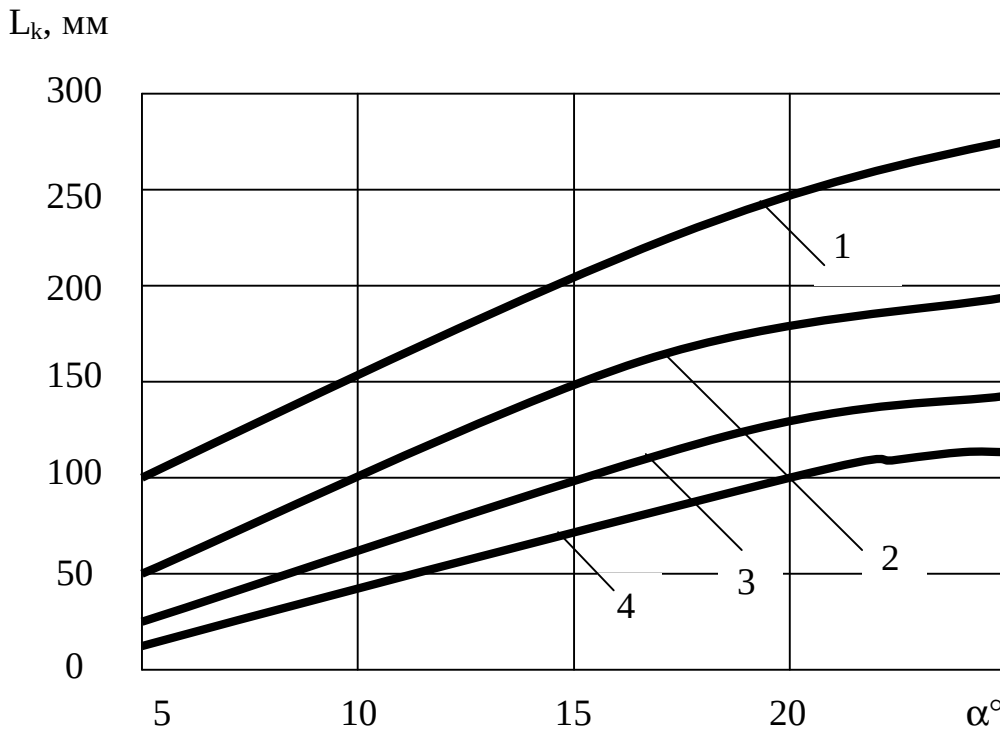


Рис. 3.14. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и относительного уменьшения диаметров формующих роликов: 1 – $\chi = 0 \%$; 2 – $\chi = 1,1 \%$; 3 – $\chi = 2,2 \%$; 4 – $\chi = 3,3 \%$ ($R_k/R_{k-1} = \chi$)

Увеличение диаметров формующих роликов от перехода к переходу позволяет производить натяжение кромки, при этом протяженность зоны плавного перехода при определенных соотношениях диаметров становится соизмеримой с межклетьевым расстоянием станка или даже (гипотетически) превышает его (рис. 3.15). Выбор режимов подгибки и соотношений диаметров формующих роликов в этом случае позволяет производить натяг кромки заготовки во избежание кромковой волнистости без ущерба для других параметров процесса. В работе [168] рассмотрены различные варианты обеспечения натяга профиля, уменьшающего неравномерность распределения продольных деформаций в поперечном сечении профиля. В первой клетке задний натяг обеспечивают за счет валкового направляющего устройства с регулируемым зазором за счет упругого обжатия плоской заготовки по толщине или применением, например, трехвалкового направляющего устройства, в котором два вала расположены как в обычной роликовой паре, а третий вал, расположенный перед ними по ходу движения заготовки, имеет вертикальное смещение, причем зазор между

валками направляющего устройства не превышает толщины заготовки (рис.3.16-а, г).

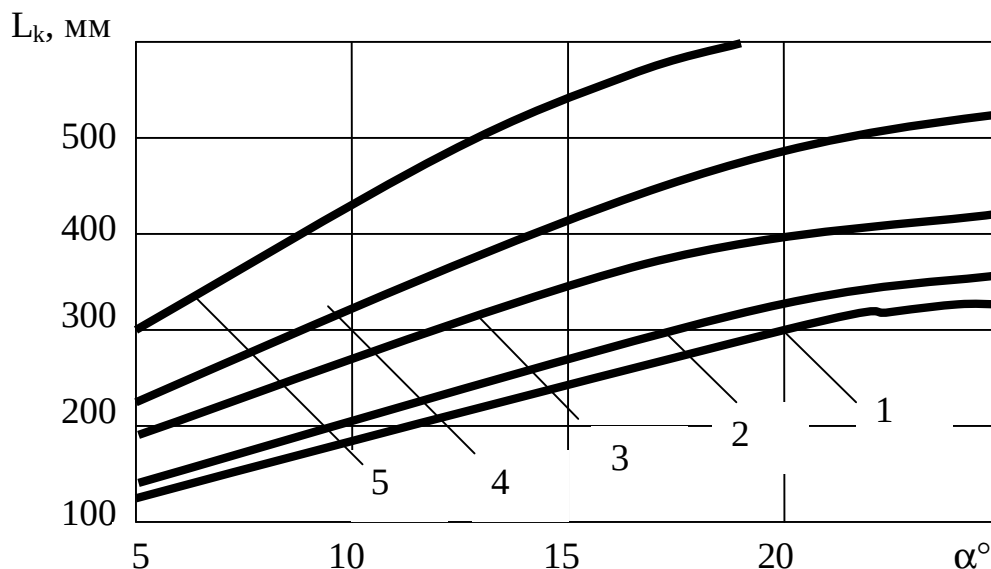


Рис.3.15. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и относительного увеличения диаметров формующих роликов: 1 – $\chi = 0\%$; 2 – $\chi = 0,22\%$; 3 – $\chi = 0,44\%$; 4 – $\chi = 0,66\%$; 5 – $\chi = 0,88\%$

В последующих переходах натяг обеспечивается несколькими путями. Во-первых, в ряде роликовых пар возможно создание режима волочения путем использования неприводных роликовых пар (рис. 3.16-б), во-вторых, применением профилегибочных станков специальной конструкции [258], в которых число зубьев привода валов увеличивается от перехода к переходу (рис. 3.16-д). В-третьих, можно предусмотреть натяг профиля в межклетьевом пространстве на стадии проектирования роликовой оснастки, увеличивая диаметры формующих роликов от перехода к переходу (рис. 3.16-в). И, наконец, натяг заготовки можно создать за счет ее дифференцированного обжима в калибрах роликовых пар (рис. 3.16-е). Последний способ является эффективным с точки зрения предотвращения кромковой волнистости, поскольку он позволяет выравнивать продольные деформации стенки и полок, однако требует высокой точности настройки профилегибочного станка при удовлетворении ряда условий на стадии проектирования оснастки. При применении стандартного оборудования наиболее приемлемым является способ последовательного увеличения диаметров формующих роликов с целью обеспечения режима натяга заготовки в процессе формообразования.

На рис. 3.17 указана зависимость L_k от коэффициента анизотропии, впрочем, как видно из графиков, колебания протяженности зоны плавного перехода для изотропного тела (кривая 2) и анизотропного тела (кривые 1 и 3) не превышают 4 – 7 %. Приведенная зависимость может оказаться полезной при изготовлении профилей из композиционных материалов.

Модель (3.56) может использоваться при разработке технологии формообразования. Так, при проектировании конфигураций роликовых калибров необходимо следить за тем, чтобы выбор параметров не приводил к превышению

расчетной величиной протяженности зоны плавного перехода величины межклетьевого расстояния. В частности, ограничение на угол подгибки в текущем технологическом переходе, в соответствии с формулой (3.56), следующее:

$$Q_k < 3 \cdot L^2 \cdot \left\{ s \cdot \left(2 - r_k^h / r_{k-1} \right) \sqrt{2 \cdot (1 - m_{12})} + b \cdot (R_k / R_{k-1} - 1) \cdot r_k \right\} / (8 \cdot b^3). \quad (3.57)$$

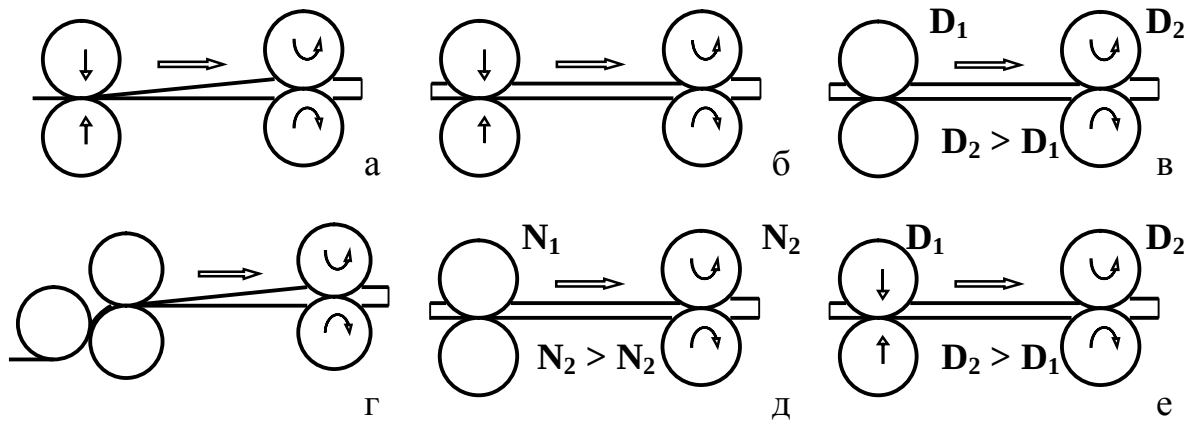


Рис. 3.16. Схемы обеспечения натяга кромки

При нарушении условия (3.57) наблюдаются излишние энергетические затраты на переформовку, необоснованное деформационное упрочнение, приводящее к снижению ресурса пластичности, создание дополнительных остаточных напряжений, ухудшающих геометрию профиля при последующих термообработках, создание продольной кривизны или даже возникновение кромковой волнистости [365].

Длину зоны плавного перехода с небольшим избытком (например, в 10%) можно взять в качестве межклетьевого расстояния при проектировании оборудования. Метод интенсивного деформирования позволяет уменьшить межклетьевого расстояние и, как следствие, уменьшить габариты оборудования и

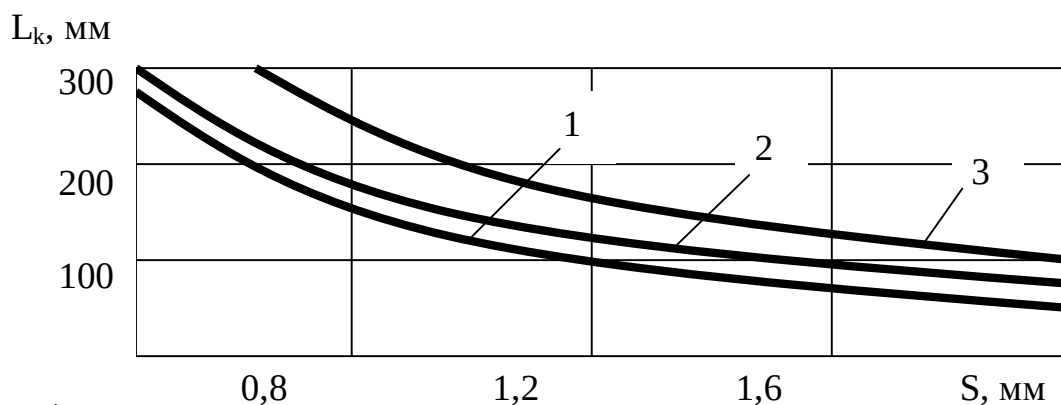


Рис. 3.17. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от толщины заготовки и коэффициента анизотропии μ_{12} :
1 – $\mu_{12} = 0,34$; 2 – $\mu_{12} = 0,5$; 3 – $\mu_{12} = 0,68$

его массу. Минимизация параметров оборудования особенно эффективна при разработке оборудования под строго ограниченную номенклатуру профилей.

Таким образом, использование разработанной модели позволяет сократить производственные затраты на стадии изготовления оборудования за счет экономии материалов, а на стадии его эксплуатации – за счет уменьшения его габаритов (сокращение производственных площадей).

3.4. Схемы формообразования профилей

Под схемой формообразования профиля понимается совокупность поперечных сечений заготовки в осевых плоскостях клетей стана и их взаимное расположение друг относительно друга. Выбор схем формообразования профиля определяет эффективность технологического решения и основывается на требовании обеспечения высокого качества профилей и экономической эффективности. Высокая эффективность технологии достигается за счет уменьшения числа переходов, простоты изготовления оснастки и ее настройки. Действительно, уменьшения числа переходов дает экономию в расходе материала на формирующий инструмент, уменьшает число факторов, влияющих на качество профилей, не требует больших складских помещений для хранения оснастки, позволяет использовать малогабаритное оборудование, не требующее большого количества времени на его настройку.

3.4.1. Схемы формообразования при стесненном изгибе

Качественный профиль с утолщением материала по углам характеризуется отсутствием внутренних и внешних дефектов поверхности, высокой точностью выполнения форм и сечений.

Схему формообразования определяют исходя из числа переходов и конфигурации сечения профиля, обычно с учетом особенностей профилегибочного оборудования [367, 368]. Число переходов для стесненного изгиба определяется на основе экспериментальной отработки технологии формообразования (см. разд. 4) и для типовых профилей установлено [217, 368, 369], что количество переходов, которое следует применять, составляет для:

- § уголкового неравнополочных профилей – **3** (или **4** – при получении из швеллера с разрезкой, совмещенной с формообразованием);
- § швеллерных – **2–3** перехода;
- § корытообразных ($\alpha < \pi/2$) – **2 (3)** перехода (для получения зетобразных профилей с разрезкой – **3 (4)**);
- § корытообразных с отбортовками – **4** перехода (с разрезкой – **5**);
- § зетобразных с двумя отбортовками – **4** перехода.

Расчет конфигураций (рис. 3.18, а, б) для уголкового профилей ведется по формулам [370]:

$$\sin(B_3/(2\rho_1)) = \sqrt{B^2 + H^2}/(2\rho_1), \quad (3.58)$$

$$\gamma = B_3/\rho_1, \quad \theta_2^2 = 2\arctg\left[\frac{\sin \gamma/2}{B/H + \cos \gamma/2}\right], \quad (3.59)$$

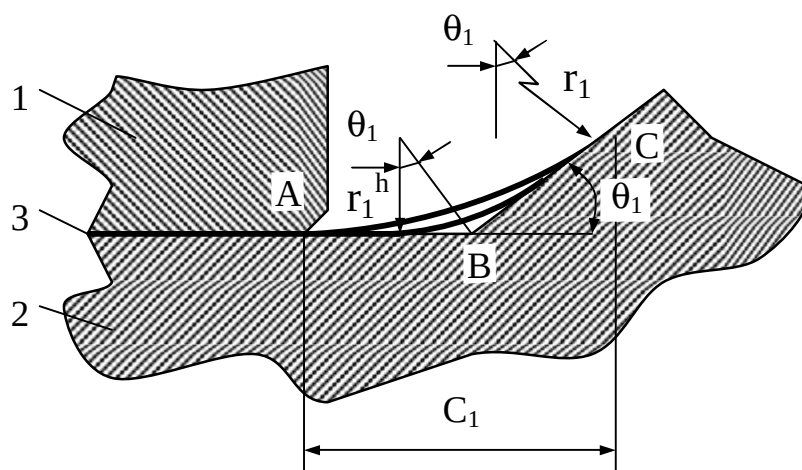
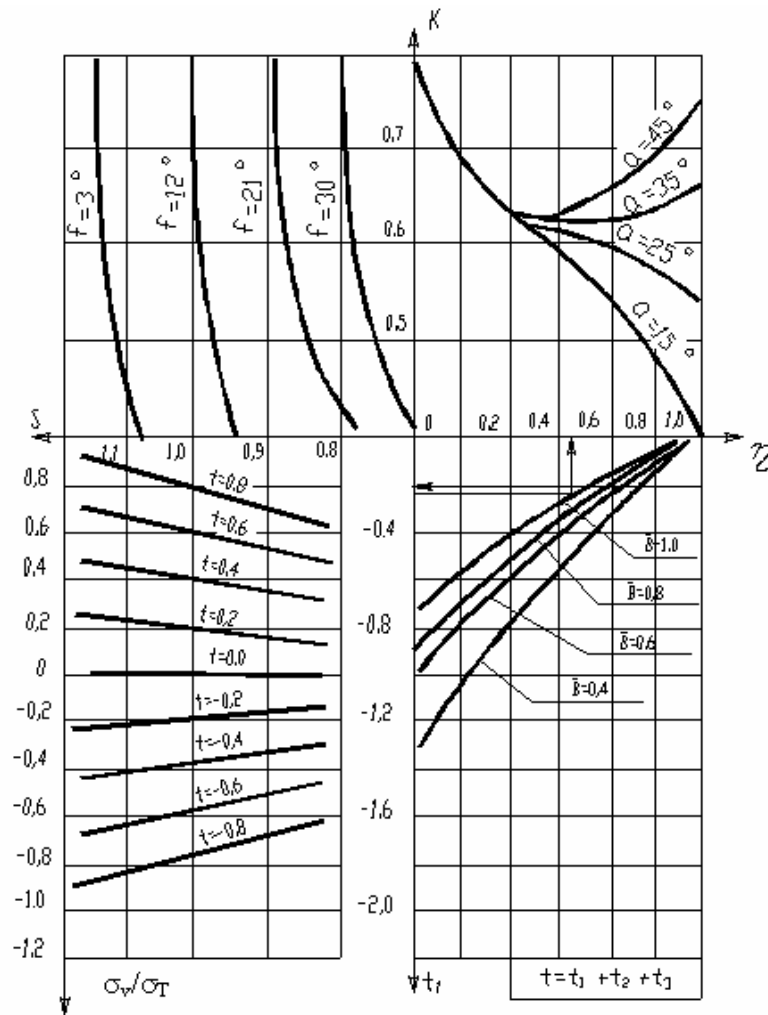
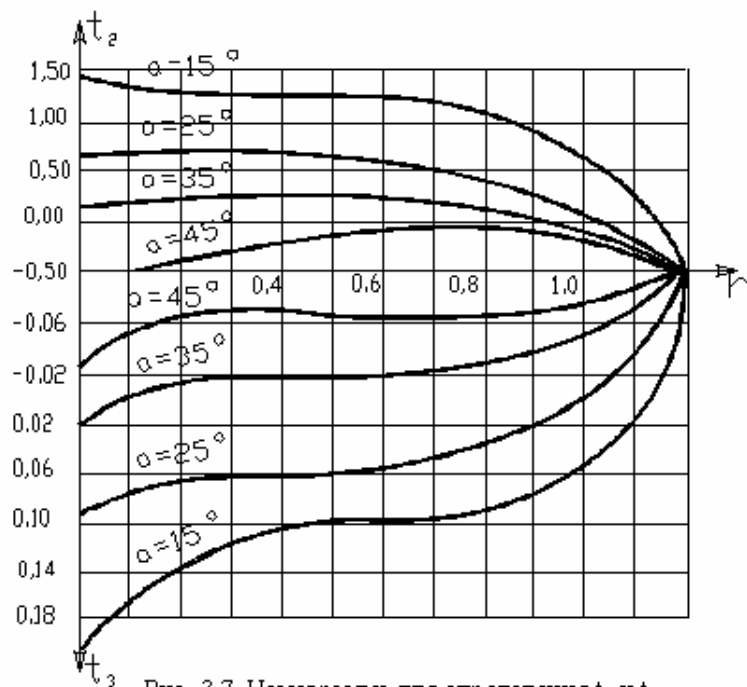


Рис. 3.11. Геометрические параметры процесса при свободной гибке и после подсадки: 1 – верхний ролик; 2 – нижний ролик; 3 – заготовка

Рис. 3.8. Номограмма для определения σ_v Рис. 3.7. Номограмма для определения t_3 и t_2

$$\theta_1^2 = \pi/2 - \theta_1^1, \quad \theta_1^1 = (\gamma - \theta_1^2)/2, \quad \theta_2^1 = (\gamma - \theta_1^1)/2, \quad (3.60)$$

где B_3 – ширина заготовки; ρ_1 – радиус кривизны заготовки; B, H – габаритные размеры уголка; γ – центральный угол; $\theta_1^1, \theta_1^2, \theta_2^1, \theta_2^2$ – соответствующие углы подгибки на первом и втором переходах.

Для швеллерного профиля (рис. 3.18, в) расчет конфигураций ведется по формулам:

$$\rho = b_1/2, \quad l_n = (B_3 - \pi/\rho)/2, \quad (3.61)$$

где ρ – радиус кривизны; b_1 – ширина стенки; l_n – длина прямолинейного участка; B_3 – ширина заготовки.

Для корытообразных профилей с углами $\alpha = \pi/2$ без отбортовок (рис. 3.18, г) и с отбортовками (рис. 3.18, д) расчет ведется по формулам:

$$\rho_1 = b_1/2, \quad \rho_2 = b_3/2, \quad l_n = [B_3 - \pi(\rho_1 + \rho_2)]/2, \quad (3.62)$$

где ρ_1, ρ_2 – радиусы кривизны; b_1, b_3 – ширина элементов профиля.

Для корытообразных профилей с углом подгибки $\alpha \neq \pi/2$ (рис. 3.18, е) и для предварительных переходов в схемах рис. 3.18, б, г, д, е расчет следует вести по формулам [216]:

$$X_k = [B_3/2 - \alpha_k / (57,3 \sin \alpha_k) (b_1/2 + b_3) - b_2] / \left(\frac{\alpha_k \operatorname{ctg} \alpha_k}{57,3} - 1 \right), \quad (3.63)$$

$$\alpha_k = \arcsin \left\{ \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{\alpha_k}{n-1} \right) + \frac{k}{n-1} \sin \alpha \right] \right\}, \quad (3.64)$$

$$\rho_1 = \frac{b_1}{2 \sin \alpha_k}, \quad \rho_2 = \frac{b_3 + X_k \sin \alpha_k}{\sin \alpha_k}, \quad (3.65)$$

где X_k – расстояние между верхней точкой боковой стенки на готовом профиле и точкой сопряжения; α_k – угол подгибки в k -ом переходе, определенные в работе [217].

Для зетовых профилей (рис. 3.18, ж, з, и) расчет конфигураций надлежит вести по формулам [216]:

$$\text{ж) } r_1 = b_1, \quad r_2 = b_2, \quad l_n = B_3 - (b_1 + b_2)p/2; \quad (3.66)$$

$$\text{з) } r_1 = 0,6b_1, \quad r_2 = 0,6b_2, \quad l_n = B_3 - (b_1 + b_2)p/2; \quad (3.67)$$

$$\text{и) } r_1 = b_1/2, \quad r_2 = b_2/2, \quad l_n = B_3 - (b_1 + b_2)p/2. \quad (3.68)$$

В других случаях при разработке форм предварительных переходов следует соблюдать условия:

- § плавности сопряжения криволинейных и прямолинейных участков заготовки;
- § выбор углов подгибки в соответствии с работой [217];
- § ширину заготовки брать с учетом избытка материала для осуществления стесненного изгиба (см. разд. 4).

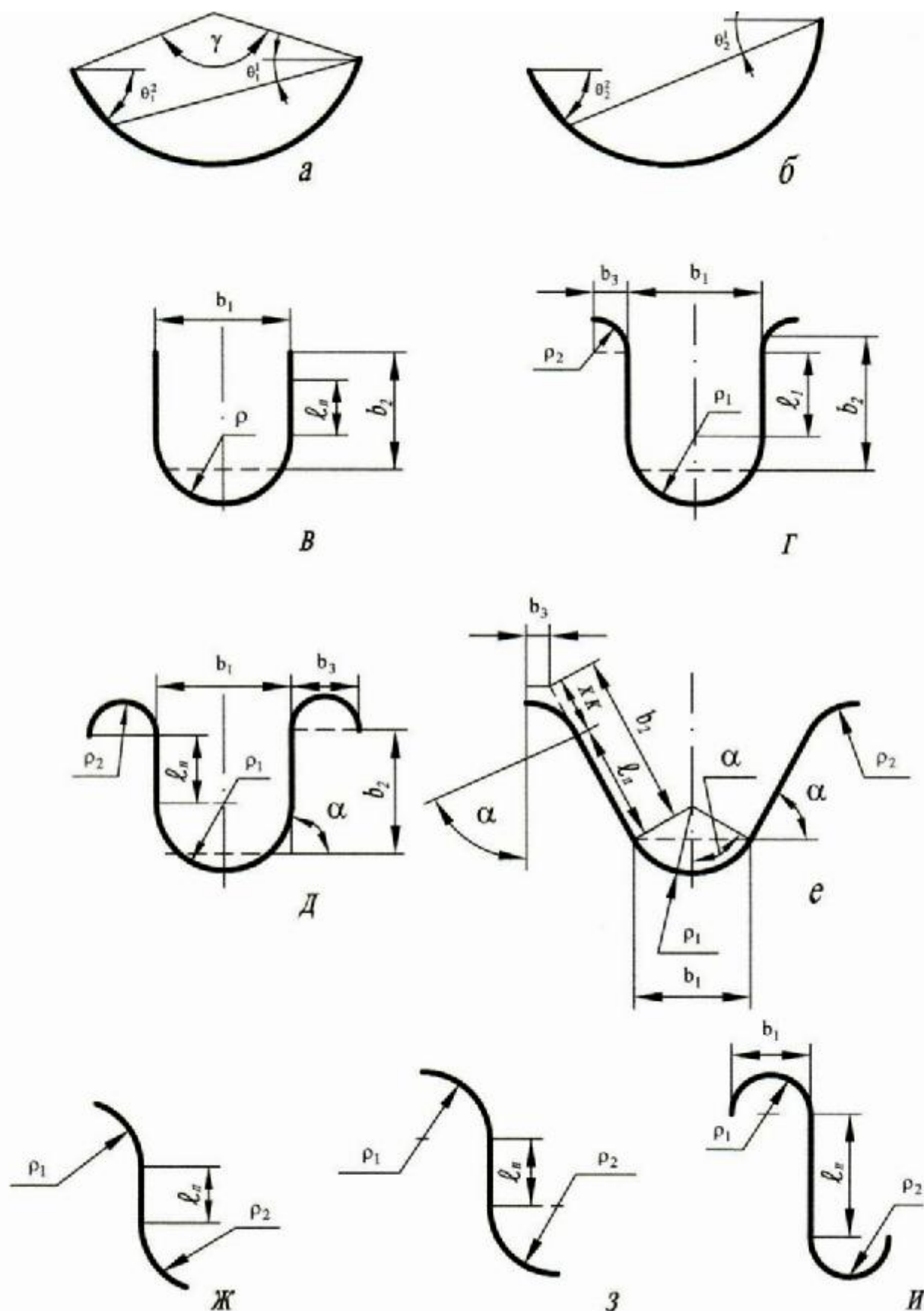


Рис. 3.18. Конфигурации профилированных заготовок

Формулы (3.58) – (3.68) получены на основе экспериментальных исследований; расчетные зависимости и технические решения по производству профилей для авиастроения отражены в авторских свидетельствах на способы формообразования [217, 370, 371, 372, 221], причем, в работе [370] описан способ изготовления зетового профиля из корытного при совмещении формообразования и продольной резки в роликах.

3.4.2. Схемы формообразования профиля при МИД

В отличие от стесненного изгиба при МИД конфигурации переходов определяются преимущественно режимами подгибки полок по переходам, задающими число переходов и обеспечивающими отсутствие дефектов профилей. В первую очередь, речь идет о дефектах формы в виде кромковой волнистости [91, 96, 98], для предотвращения которой авторами разработаны классификатор способов и сами способы предотвращения кромковой волнистости [344].

3.5. Классификация способов предотвращения потери устойчивости периферийных элементов профиля

Из основных неустраняемых правкой дефектов профилей – излом полки, линии Чернова – Людерса, хлопуны и кромковая волнистость – последняя является наиболее серьезным и часто повторяющимся (в 85 – 90 % случаев) дефектом при отработке технологии формообразования профиля в роликах [344].

Зависимость появления этого дефекта от параметров оборудования, числа переходов, конфигурации калибров роликов и настроечных параметров технологического процесса предполагает построение математических моделей с целью оптимизации процесса профилирования и совершенствования профилегибочного оборудования.

Потеря устойчивости периферийных элементов профиля является главным ограничением технологических возможностей метода интенсивного деформирования. Наибольшую склонность к потере устойчивости в виде кромковой волнистости имеют швеллерные профили, жесткость подгибаемых полок которых сравнительно мала.

На рис. 3.19 приведен классификатор способов предотвращения кромковой волнистости [373], направленных на уменьшение продольных деформаций подгибаемых элементов или выравнивание продольной деформации по сечению профиля. Ряд способов может быть применен только при определенных условиях. Например, схемы 1.1, 1.2, 1.3 и отчасти 1.5 могут быть реализованы, как правило, при переходе к очередному поколению станов при доработке их конструкции. Однако целесообразность такого подхода определяется номенклатурой профильной продукции, подлежащей изготовлению на данном оборудовании, и экономическими показателями его эксплуатации. Увеличение числа клеток, межклетьевого и межосевого расстояний ведет к увеличению объемов технологического оснащения, габаритов оборудования [365, 284], и, следовательно, к увеличению капитальных затрат. Мероприятия по модернизации обо-

рудования экономически оправданы, как правило, лишь в серийном производстве типовых профилей.



Рис. 3.19. Классификатор способов предотвращения кромковой волнистости

Схема 1.4 может быть реализована установкой дополнительной клетки для предотвращения «развала» широкого профиля и «схлопывания» профиля небольших габаритов (порядка 20х20 мм). Что касается скоростного режима профилирования (схема 1.5) при мелкосерийном производстве, то, как показывает производственный опыт, загрузка оборудования на предприятиях составляет 1 – 1,5 смены при скорости профилирования от 6 до 20 метров в минуту. Скорости профилирования до 20 м/мин допускают углы подгибки на первых переходах до 25° – 30° за переход, что позволяет существенно интенсифицировать технологический процесс профилирования.

Конфигурации переходов (рис. 3.19, схема 2.1) можно оптимизировать за счет участков высвобождения в калибре и различных видов его замыканий. Однако при наличии участков высвобождения и отклонениях зазора по ширине калибра возникают дополнительные деформации (при обжиге) или поперечное фланирование заготовки (при превышении номинального зазора калибра). В том и другом случае возрастает вероятность появления кромковой волнистости, в связи с чем на практике применяют закрытые калибры с номинальным зазором, что исключает необходимость рассмотрения схем дифференцированного обжига заготовки.

Применение элементов жесткости (рис. 3.19, схема 2.4) в форме устранимых или неустранимых рифтов, вводимых при проработке профиля на технологичность, может давать хорошие результаты по предотвращению кромковой волнистости [373]. Последнее в обязательном порядке подлежит согласованию с заказчиком, поскольку введение элементов жесткости может входить в противоречие с функциональным назначением профиля, требованиями сборки, внешнего вида и т.п. Использование элементов жесткости несколько уменьшает происходящие на каждом из переходов деформации за счет повышения уровня сжимающих напряжений донной части профиля, причем, в ряде случаев не происходит увеличения расхода материала ввиду локальной деформации материала (вытяжки).

Использование заготовок волнообразной формы (рис. 3.19, схема 2.5) с целью предотвращения кромковой волнистости возможно лишь для профилей корытного типа и мелкосортных швеллеров с небольшой шириной донной части. В этом случае за счет осадки донной части профиля возможно достижение примерно одинаковых деформаций кромки и донной части, однако уровень остаточных напряжений может приближаться к пределу текучести материала, что существенно ухудшает эксплуатационные характеристики профиля.

Схемы 3 и 4 (рис. 3.19) используются для изменения формы линии профилирования (углов захода и выхода профиля) и рассматриваются в разделе 2.5.

3.6. Оптимизация углов подгибки элементов профиля

При мелкосерийном производстве гнутых профилей в роликах в условиях ограниченного числа переходов напряженно-деформированное состояние заготовки (полосы) в межклетьевом пространстве и контактной зоне текущего технологического перехода определяет величину продольного прогиба и наличие/отсутствие кромковой волнистости на полках производимых профилей [201, 277]. Кромковая волнистость является, вообще говоря, неисправимым браком, а значительный продольный прогиб по выходу из последней пары роликов в большинстве случаев также приводит к потере устойчивости полок при попытке исправить его с помощью правильного устройства. Такая ситуация является типичной при изготовлении широкополочных тонкостенных профилей с соотношением ширины полки и ее толщины более тридцати при неверном выборе углов подгибки по переходам. При прочих равных условиях предотвращение вышеуказанных дефектов достигается равномерным распределением

продольных пластических деформаций подгибаемых полок по переходам [326, 374]. Однако взаимосвязь деформаций и углов подгибки до настоящего времени не была представлена реалистичными моделями, позволяющими производить расчет углов подгибки полок по переходам, а потому последние назначались на основании опыта разработчика.

Определим деформации швеллерного профиля с шириной дна C , шириной подгибаемой полки b и толщиной s в роликах k -го перехода. Закономерности процесса формообразования швеллерного профиля могут быть обобщены на некоторые более сложные типы профилей путем введения понятия «приведенной жесткости» подгибаемой полки [365]. В контактной зоне подгибка полки производится коническими поверхностями роликов, где происходит как бы «наматывание» её на ролик (рис. 3.20).

Обозначим напряжения заготовки в направлении образующей конической поверхности, проходящей через данную точку, σ_r ; перпендикулярные им напряжения и параллельные оси профилирования σ_t ; нормальные к поверхности заготовки напряжения σ_n .

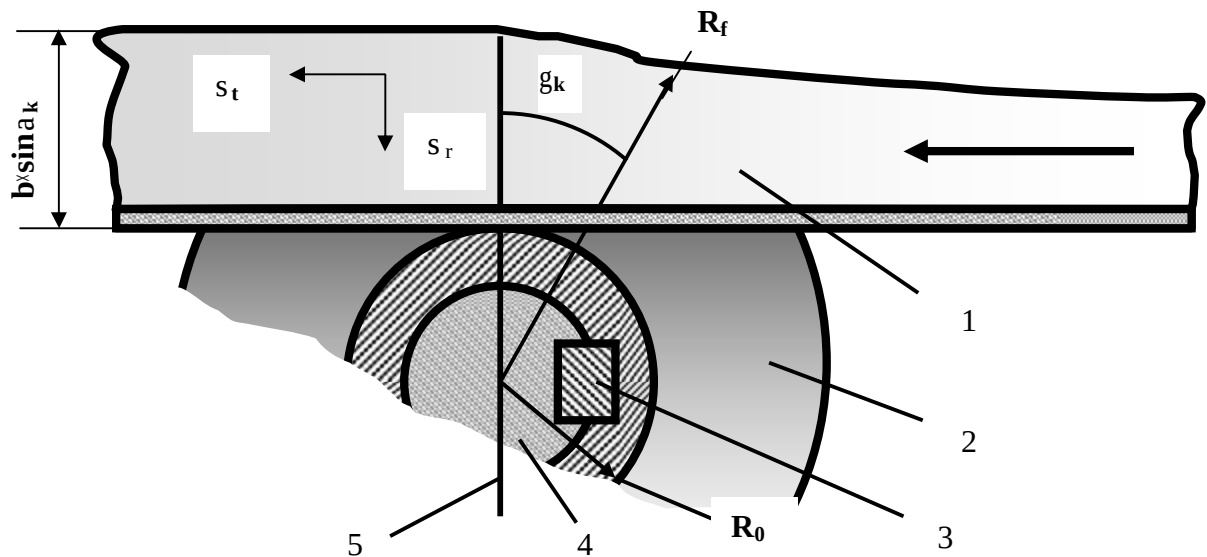


Рис. 3.20. Контактная зона: 1 – заготовка; 2 – нижний формующий ролик; 3 – шпонка; 4 – вал станка; 5 – осевая плоскость текущего перехода

Подгибаемая полка в контактной зоне может быть представлена конической оболочкой, для которой уравнение равновесия имеет вид [274, 132]:

$$r \frac{\partial s_r}{\partial r} + s_r - \frac{f \cdot r}{\sin a_k} \cdot \left(\frac{s_r}{R_r} + \frac{s_t}{R_t} \right) = 0, \quad (3.69)$$

где f – коэффициент трения между заготовкой и роликом; R_r , R_t – радиусы кривизны поверхности заготовки в направлении образующей конуса валков и в окружном направлении соответственно, мм; a_k – суммарный угол подгибки полки в текущем переходе k , град.

В уравнении (3.69) индексы перехода у напряжений и радиусов кривизны условно опущены. При ширине развертки заготовки, превышающей на величину $2\Delta h$ развертку калибра, граничное условие на кромке имеет вид:

$$s_r(R_f^k) = s_a. \quad (3.70)$$

где $R_f^k = R_f^0 + b \cdot \sin a_k$ (R_f^0 – радиус базовой поверхности нижнего формующего ролика), мм; $\sigma_a(\Delta h)$ – напряжение торцевого поджатия, определенное в работе [121]. Решение дифференциального уравнения (3.69) при $R_r = \infty$, $R_t = r/(\cos a_k)$ с соответствующим условием пластичности, учитывающим принятые допущения, и граничным условием (3.70) приводит к следующей зависимости:

$$s_r(r) = \frac{R_f^k}{r} \cdot \left[s_a + s_s \cdot \left(\frac{f \cdot \operatorname{ctg} a_k}{1 - f \cdot \operatorname{ctg} a_k} \right) \right] - s_s \cdot \frac{f \cdot \operatorname{ctg} a_k}{1 - f \cdot \operatorname{ctg} a_k}. \quad (3.71)$$

Для определения деформаций в контактной зоне используем допущение о подобии схем напряженного и деформированного состояния полки:

$$\frac{s_r - s_n}{s_t - s_n} = \frac{e_r^c - e_n^c}{e_t^c - e_n^c}, \quad (3.72)$$

где e_r^c , e_n^c , e_t^c – логарифмические деформации по ширине, толщине и вдоль полки в направлении профилирования соответственно.

Используя допущение о несжимаемости материала и пренебрежимой малости напряжений по толщине заготовки, из соотношения (3.72) получаем:

$$e_n^e = \frac{h+1}{h-2} \cdot e_t^c, \quad e_r^c = \frac{1-2 \cdot h}{h-2} \cdot e_t^c, \quad (3.73)$$

где $h = s_r / s_t$.

Угол подгибки полки q_k в текущем переходе определяет уровень ее деформаций. В контактной зоне приобретаемые пластические деформации полки определяются через угол контакта роликов и заготовки с учетом фактора χ увеличения жесткости профиля по мере поднятия полок:

$$\chi = \frac{J_k}{J_n} \approx (\sin a_k)^2, \quad (3.74)$$

где J_k , J_n – моменты инерции трансверсального сечения заготовки на текущем k -ом переходе и окончательном n -ом переходе относительно горизонтальной оси, проходящей через центр масс сечения, соответственно, мм⁴. Отметим, что на возможность учета жесткости заготовки в виде (3.74) указано в работе [201].

Угол контакта заготовки и роликов k -го перехода γ_k можно определить, решая совместно уравнение окружности (сечение роликов вертикальной плоскостью, параллельной оси профилирования) и уравнение следа винтовой линии (траектории точек, равноотстоящих от кромки заготовки) [365]:

$$g_k = \arccos \left[\frac{L_k^2 - (r \cdot \sin q_k)^2}{L_k^2 + (r \cdot \sin q_k)^2} \right], \quad (3.75)$$

где L_k – протяженность зоны плавного перехода перед k -ым калибром, зависящая от угла подгибки, ширины полки и толщины материала заготовки, мм.

Принимая линейный закон изменения продольных деформаций по ширине полки согласно принятому допущению и вводя индексацию переходов, с учетом формулы (3.75), после несложных преобразований получим значение продольной логарифмической деформации в контактной зоне e_{tk}^c :

$$e_{tk}^c = \frac{(\sin a_k)^2}{12} \cdot \left[\frac{r - R_0^k}{b \cdot \sin a_k} \right] \cdot g_k^2 \quad (3.76)$$

где $r = R_0^k + r \cdot \sin a_k$, причем значение r удовлетворяет условию: $b \geq r \geq 0$.

Продольная деформация в зоне плавного перехода e_{tk}^f определяется соотношением, полученным на основе работы [365]:

$$e_{tk}^f = \frac{q^2}{2 \cdot (L_k)^2} \cdot \left[\frac{r - R_0^k}{\sin a_k} \right]^2. \quad (3.77)$$

С учетом свойства аддитивности логарифмических деформаций и зависимостей (3.76) и (3.77), получим суммарное значение продольной пластической деформации подгибаемой полки:

$$e_{tk} = e_{tk}^c + e_{tk}^f, \quad (3.78)$$

где e_{tk} – суммарная продольная деформация подгибаемой полки на уровне осевой плоскости текущего технологического перехода.

Рассмотрим также суммарные деформации полки в поперечном направлении e_{rk} и по толщине e_{nk} . Из соотношений (2.26), с учетом свойства аддитивности логарифмических деформаций и введения индексации переходов, получим деформации вблизи кромки ($\eta = 0, r = b$):

$$e_{nk}^{kp} \approx -\frac{1}{2} \cdot (e_{tk}^{c\,kp} + e_{tk}^{f\,kp}), \quad e_{rk}^{kp} \approx -\frac{1}{2} \cdot (e_{tk}^{c\,kp} + e_{tk}^{f\,kp}), \quad (3.79)$$

где e_{nk}^{kp}, e_{rk}^{kp} – деформации на кромке по толщине и в поперечном направлении соответственно; $e_{tk}^{c\,kp}, e_{tk}^{f\,kp}$ – продольные деформации на кромке в контактной и свободной зоне соответственно.

Поперечные деформации 3.79 малы и практически не могут оказывать влияния на устойчивость периферийных элементов. На рис. 3.21 приведены графики зависимости продольной деформации кромки от угла подгибки полки в текущем переходе q и суммарного угла подгибки в соответствии с формулой (3.78) при $R_0 = 45$ мм, $b = 45$ мм, $r = R_f$. Как уже отмечалось, одним из основных условий нормального протекания процесса профилирования является равномерность распределения деформаций подгибаемых полок по переходам. При прочих равных условиях эти деформации зависят от ширины полки, суммарно-

го угла подгибки и угла подгибки в текущем переходе. Можно указать относительно простой алгоритм обеспечения данного условия при разработке технологии профилирования [375, 344]. При заданном числе переходов (что определяется наличным оборудованием) вычисляют средний угол подгибки θ_{cp} за переход по формуле:

$$q_{cp} = \frac{a_N^{\Sigma}}{N}, \quad (3.80)$$

где a_N^{Σ} – суммарный угол между дном и полкой готового профиля по чертежу; N – общее число переходов.

Затем вычисляют среднюю деформацию процесса формообразования за переход e_t^{cp} согласно соотношению:

$$e_t^{cp} = \frac{e_{tk}(q_{cp}, a_1) + e_{tk}(q_{cp}, a_N)}{2}. \quad (3.81)$$

В формуле (3.81) $a_1 = q_{cp}$, $a_N = a^{\dot{a}}$.

Значения $e_{tk}(q_{cp}, a_1)$ и $e_{tk}(q_{cp}, a_N)$ в формуле (3.81) можно определить расчетным путем в соответствии с зависимостью (3.78) или по графикам рис. 3.21. Затем из уравнения (3.78) численным методом можно определить угол подгибки для каждого из переходов. Однако проще это сделать графически.

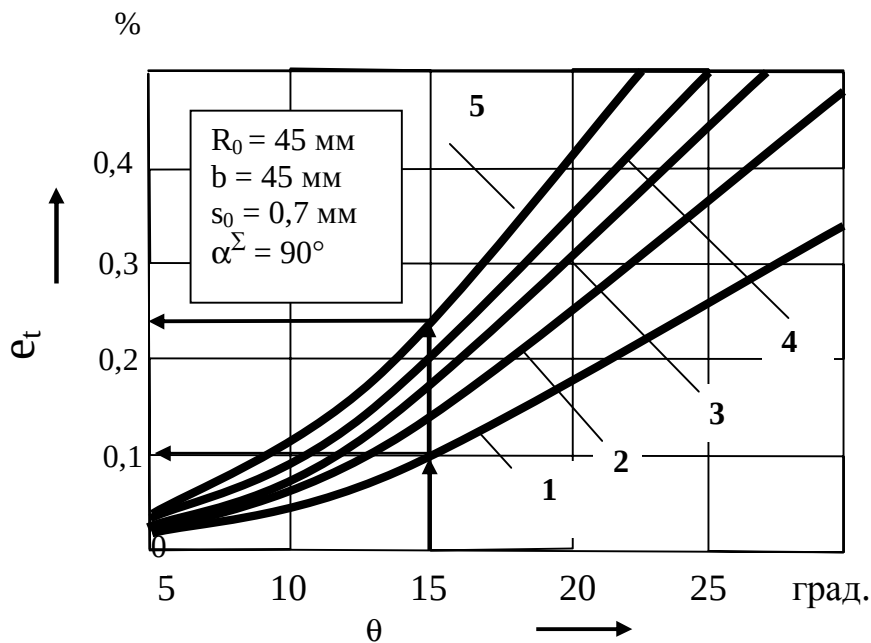


Рис. 3.21. Графики для определения средней продольной деформации кромки: 1 – $\alpha = 15^{\circ}$; 2 – $\alpha = 30^{\circ}$; 3 – $\alpha = 45^{\circ}$; 4 – $\alpha = 60^{\circ}$; 5 – $\alpha = 90^{\circ}$

По формулам (3.75) – (3.78), (3.80) и (3.81) выполнены расчеты деформаций кромки профиля в среде MathCAD 2001 Pro и построены графики рис. 3.21 и 3.22. На рис. 3.21 линиями со стрелками указана процедура определения $e_{tk}(q_{cp}, a_1)$ и $e_{tk}(q_{cp}, a_N)$ графически для первого ($k = 1$) и последнего ($k = N$) перехода. На рис. 3.22 представлены зависимости продольной деформации кромки от угла подгибки и номера перехода; последний условно ассоциирован

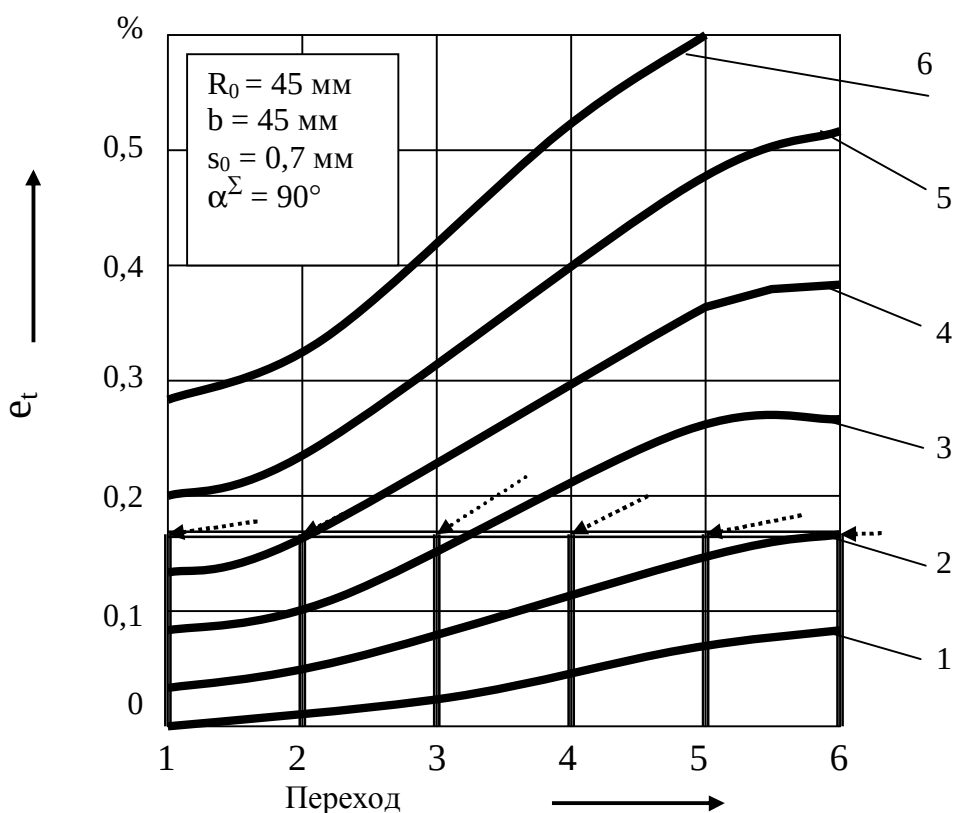


Рис. 3.22. График определения углов подгибки по переходам: 1 – $\theta = 5^\circ$; 2 – $\theta = 10^\circ$; 3 – $\theta = 15^\circ$; 4 – $\theta = 20^\circ$; 5 – $\theta = 25^\circ$; 6 – $\theta = 30^\circ$

с соответствующим значением суммарного угла подгибки на текущем переходе при равномерном разбиении угла между дном и полкой готового профиля по переходам. Пунктирными стрелками обозначены промежуточные кривые, проходящие через вертикальные маркеры переходов при одном и том же уровне деформации кромки, рассчитанной на основе данных рис. 3.21 и формулы (3.78). Углы, соответствующие пунктирным линиям со стрелками, являются исходными для разработки технологии. Следует заметить, что для формообразования профилей с широким дном ($C > 2b$) режимы подгибки могут назначаться более жесткими, чем расчетные. Указанное обстоятельство связано с «ослаблением» углов подгибки за счет прогиба донной части профиля (см. обсуждение данного вопроса ниже и в разд. 4).

3.7. Зависимость деформаций подгибаемой полки от способа предотвращения волнистости ее кромки

Исключив из рассмотрения упомянутые в п. 3.5 схемы, ограничимся изучением влияния остальных способов предотвращения кромочной волнистости (см. рис. 3.19) на деформационные характеристики подгибаемых элементов при изготовлении швеллерных профилей [373]. В общем случае логарифмическая деформация подгибаемых полок в k -ом переходе функционально представляется в следующем виде:

$$e_k = f_k(\Pi_o, \Pi_c, \Pi_n, \Pi_d, \Gamma_n, M_n) \quad (3.82)$$

где f_k – функция деформации; $\Pi_o, \Pi_c, \Pi_n, \Pi_d$ – параметры оборудования, оснастки, настройки процесса и дополнительных устройств соответственно; Γ_n, M_n – геометрические и механические характеристики профиля соответственно.

Конкретизируем общую зависимость (3.82) с целью перехода к количественным характеристикам процесса профилирования. В межклетьевом пространстве между $(k-1)$ -ым и k -ым переходами (рис. 3.23) заготовку можно разделить на зону упругого состояния 1, зону свободного формообразования 2 и контактную зону 3. Заготовка приобретает продольные пластические деформации во второй и третьей зонах. Вычислим предварительно угол обхвата γ нижнего ролика k -го перехода заготовкой при формообразовании, полагая, что контакт заготовки и ролика начинается в точке пересечения прямой, соединяющей точки пересечения кромки заготовки с осевыми плоскостями $(k-1)$ -го и k -го переходов.

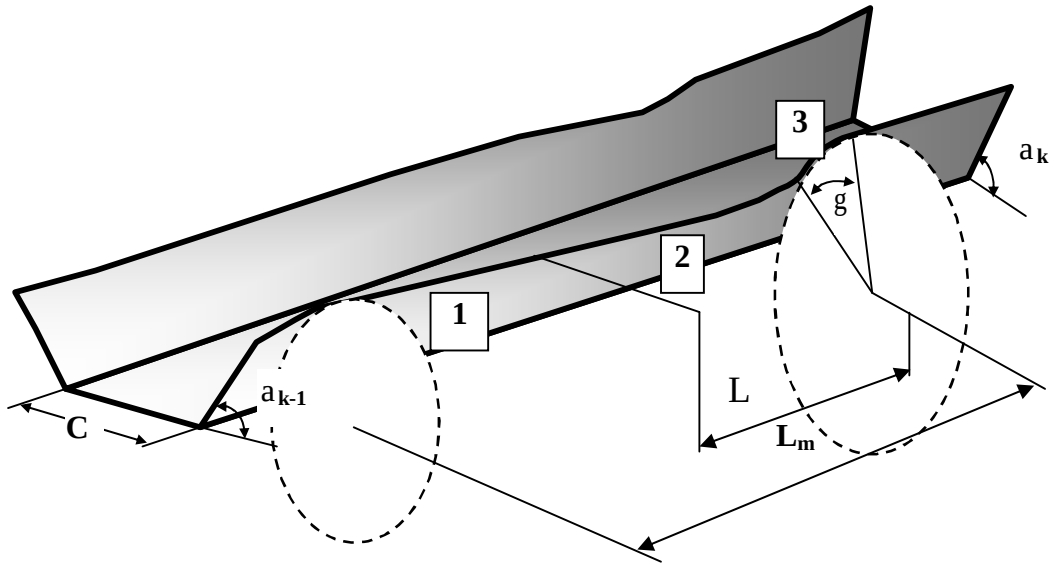


Рис. 3.23. Зоны заготовки в межклетьевом пространстве: 1 – зона стабилизации; 2 – зона плавного перехода; 3 – контактная зона

Расчеты показывают [373], что

$$g(L_M) = \arccos \left(\frac{L_M^2 - (b \cdot \sin q_k)^2}{L_M^2 + (b \cdot \sin q_k)^2} \right), \quad q_k = a_k - a_{k-1}, \quad (3.83)$$

где a_k, a_{k-1} – углы подгибки на k -ом и $(k-1)$ -ом переходах соответственно; L_M – межклетьевое расстояние, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм.

Формула (3.83) аналогична зависимости (3.75), однако здесь входящие параметры определены применительно к способу, связанному с натягом кромки.

В зоне 2 деформацию можно определить из следующих геометрических соотношений. Полное смещение кромки заготовки Δ вычисляется по формуле:

$$D = b \cdot \sqrt{(\cos a_{k-1} - \cos a_k)^2 + (\sin a_{k-1} - \sin a_k)^2}. \quad (3.84)$$

Произведя преобразования в формуле (3.84) и используя определение логарифмической деформации [274], с учетом соотношения (3.83) получим:

$$e_k^f = \ln \sqrt{1 + \left[\frac{2 \cdot b \cdot \sin \frac{q}{2}}{L - (R_k^0 + b \cdot \sin q) \cdot \sin g(L_M)} \right]^2}, \quad (3.85)$$

где e_k^f – продольная деформация кромки заготовки в зоне свободного формообразования на k -ом переходе; R_k^0 – радиус катающих валков под стенкой в k -ом переходе, мм.

Значение L в формуле (3.85) является функцией угла подгибки, ширины полки, толщины заготовки и параметров оснастки [365, 344].

В контактной зоне для случая, когда линия профилирования – прямая, продольная деформация кромки e_k^c определяется соотношением:

$$e_k^c = \ln \frac{g(L_M)}{\sin g(L_M)}. \quad (3.86)$$

Исследования показывают [284], что изменение формы линии профилирования (рис. 3.19, схема 3.1) существенно влияет на деформационные характеристики подгибаемых полок, так что зависимость деформации кромки от формы линии профилирования (или углов захода и выхода профиля в вертикальной плоскости k -го калибра) можно задать формулой:

$$e_k^b = \ln(1 - h_k^1 \cdot b_k^1)(1 - h_k^2 \cdot b_k^2), \quad (3.87)$$

где h_k^1, h_k^2 – коэффициенты, определенные в работе [373]; b_k^1, b_k^2 – углы захода и выхода профиля в k -ом переходе.

Используя свойство аддитивности логарифмических деформаций, из соотношений (3.85) – (3.87) получим продольную e_k деформацию кромки в k -ом переходе:

$$e_k = e_k^f + e_k^c + e_k^b. \quad (3.88)$$

Очевидно, суммарную деформацию после k -го перехода можно определить суммированием деформаций полок (3.88) на всех переходах:

$$e_k^\Sigma = \sum_{i=1}^k e_i. \quad (3.89)$$

Возможность появления кромковой волнистости можно прогнозировать, сравнивая накопленную деформацию (3.89) с критической деформацией, соответствующей потере устойчивости полки, согласно, например, работам [331, 374]. На рис. 3.24 представлены зависимости продольных деформаций кромки от параметров процесса, связанных с тем или иным способом предотвращения кромковой волнистости. На рис. 3.24-а по оси ординат представлена деформация $efc = e_k^f + e_k^c$ в зависимости от углов подгибки и ширины полки профиля. Деформация efc несколько снижается с шириной подгибаемой полки, что обу-

словлено влиянием зоны плавного перехода. Однако с точки зрения потери устойчивости полки большее значение имеет ее ширина. Поэтому при одном и том же значении деформации полок, кромковой волнистости будет подвержена та, ширина которой больше.

На рис. 3.24-б приведены графики зависимости продольной деформации от углов захода и выхода профиля при ширине полки 45 мм. Суммарная деформация при изменении углов захода уменьшается ввиду разных знаков слагаемых деформаций. Как видно на рис. 3.24-б, большее влияние на продольную деформацию имеют углы выхода, чем углы захода. Углы захода и выхода могут быть пересчитаны на форму линии профилирования по переходам. Если подсчитать деформации по формуле (3.89), то в отсутствие потери устойчивости полок можно вычислить и относительное удлинение профиля. Экспериментальные данные (см. разд. 4) также свидетельствуют об удлинении профиля при формообразовании. Это обстоятельство лишь подтверждает наличие пластических зон на участках заготовки, примыкающих к роликовому калибру.

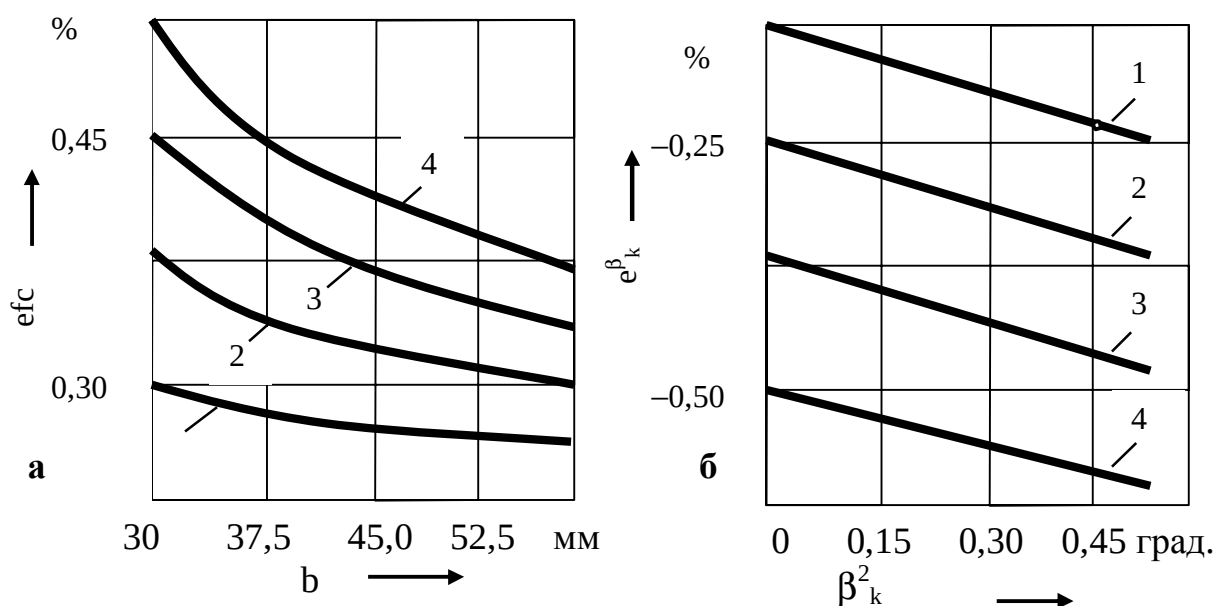


Рис. 3.24. Зависимость деформаций кромки от параметров процесса:

а – от ширины полки b и углов подгибки θ : 1 – $\theta = 6^\circ$, 2 – $\theta = 12^\circ$, 3 – $\theta = 18^\circ$, 4 – $\theta = 24^\circ$; б – от углов захода β_k^1 и выхода β_k^2 : 1 – $\beta_k^1 = 0^\circ$, 2 – $\beta_k^1 = 1^\circ$, 3 – $\beta_k^1 = 2^\circ$, 4 – $\beta_k^1 = 3^\circ$

По сравнению с влиянием геометрических характеристик сечения профиля и углов подгибки влияние углов захода и выхода является более эффективным инструментом воздействия на деформационные характеристики полок, что связано с режимами настройки и применением дополнительных устройств, влияющих в большей степени на протяженность зоны плавного перехода и, следовательно, на деформацию efc .

Однако использование этих способов предотвращения кромковой волнистости сопряжено с некоторым усложнением технологии и их применение целесообразно лишь в обоснованных случаях (см. разд. 6).

3.8. Критерий возникновения кромковой волнистости

При подгибке полки на k – ом переходе ее продольная деформация определяется соотношением (3.88), а суммарная деформация, приобретенная полкой к k – ому переходу включительно, – формулой (3.89), в которой учтено влияние последующих клеток (см. формулу (3.87) и рис. 3.24). Картина распределения деформаций полок по переходам в этой связи может быть различной в зависимости от соотношения геометрических параметров сечения профиля и расположения калибров по отношению друг к другу.

В отсутствие последующих клеток профиль приобретает продольную кривизну радиуса R_L (рис. 3.25), который можно определить экспериментально, устранив последующие переходы. Приняв приемлемую базу измерения длины профиля (например $L_b = 1000$ мм) и производя замеры стрелы прогиба h_k , радиус продольной кривизны R_L можно определить по формуле:

$$R_L^k = \frac{h_k^2 + L_k^2/4}{2 \cdot h_k}. \quad (3.90)$$

Для сечения профиля в текущем переходе можно определить положение центра тяжести h_k^{cg} относительно дна профиля по формуле:

$$h_k^{cg} = \frac{\int_{(A)} y dA}{\int_{(A)} dA}, \quad (3.91)$$

где y – координата центра тяжести элементарной площадки dA .

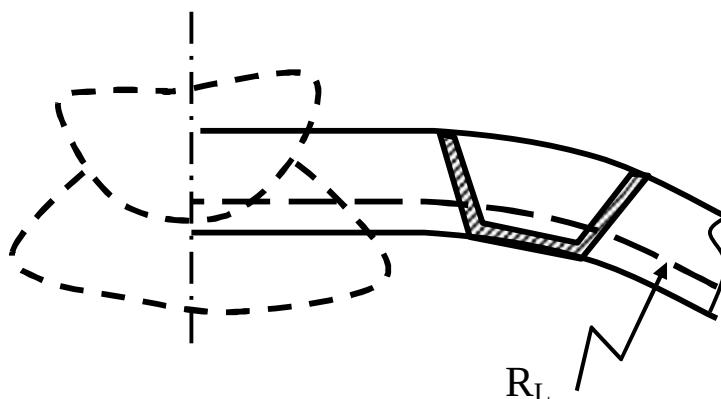


Рис. 3.25. Продольная кривизна профиля после очередного перехода в отсутствие последующих клеток

Эффективную продольную деформацию e_k^e на кромке с учетом формул (3.90) и (3.91) можно определить следующим образом:

$$e_k^e \approx \ln \left[\frac{H_k - h_k^{cg}}{R_L^k} + 1 \right], \quad (3.92)$$

где H_k – высота профиля после k – го перехода, мм.

Наличие последующих клеток приводит к спрямлению профиля путем подачи возвращающей силы F_k в очаг пластической деформации на уровне осевой плоскости текущего перехода (рис. 3.26). В осевой плоскости периферийные элементы полок находятся в пластическом состоянии, в то время как дон-

ная часть профиля может пребывать в упруго-пластическом состоянии. Поворот сечения относительно горизонтальной оси в зависимости от соотношения геометрических параметров и условий формообразования приводит к возникновению пластического шарнира [375]. Поэтому расчетные значения деформаций (3.89) могут несколько отличаться от эффективных продольных деформаций (3.92), определяемых экспериментально. Деформирование заготовки продолжается и за осевой плоскостью по ходу движения профиля в зоне пластического шарнира, причем, настройкой оборудования продольные деформации полок могут быть уменьшены не только равномерно по переходам, но даже и в одном из переходов в соответствии с формулами (3.87), (3.88). В станках с фиксированным положением нижних рабочих валов изменение углов захода профиля в калибр и его выхода реализуется исключительно изменением базовых диаметров формующих роликов, что серьезно осложняет процесс отработки технологии. Поэтому профилегибочное оборудование обычно имеет также регулируемые нижние валы клетей.

Остаточные неустраненные в текущем переходе продольные деформации полок вызывают «набегание» материала по отношению к донной части профиля, что является причиной возникновения сжимающих напряжений полок, приводящих к потере устойчивости полок в форме кромковой волнистости [162].

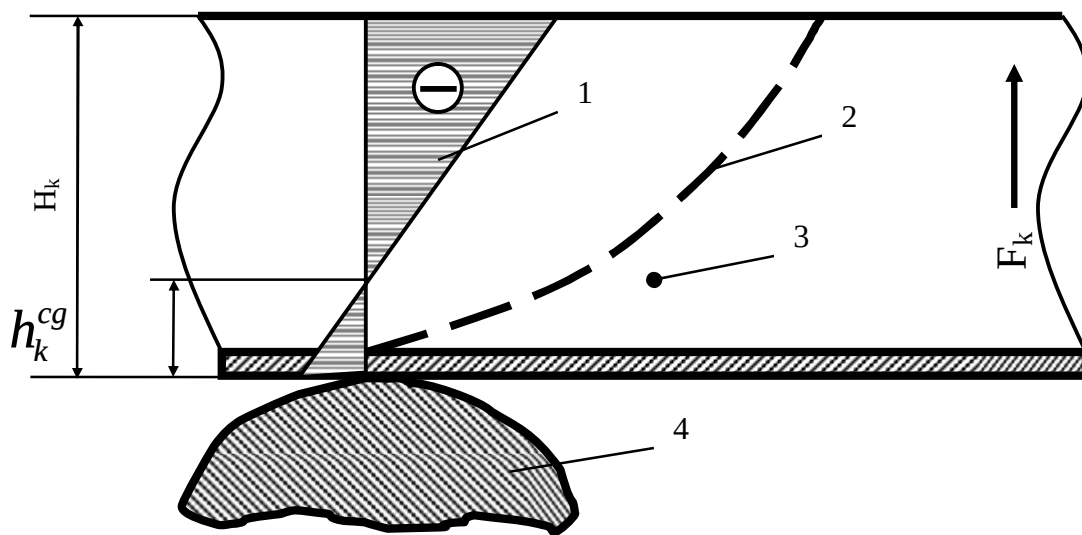


Рис. 3.26. Схема влияния последующего перехода: 1 – эпюра напряжений от действия силы F_k ; 2 – контур верхнего ролика; 3 – профиль; 4 – нижний ролик

Для установления критических деформаций полк, приводящих к потере устойчивости, воспользуемся результатами модельной задачи гибки профиля по контуру полками во внутрь (рис. 3.27), позволяющей определять критические напряжения сжатия полок s_k^{cr} [331, 376]:

$$s_k^{cr} = k^* \cdot \frac{p^2 \cdot E \cdot \sqrt{t_k^*}}{12 \cdot (1 - m^2)} \cdot \left(\frac{s}{H_k - h_k^{cg}} \right)^2, \quad (3.93)$$

где k^* – коэффициент, учитывающий условия закрепления краев полки; E, μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; s – толщина стенок профиля, мм; H_k, h_k^{cg} – высота профиля и координата центра тяжести сечения профиля на k – ом переходе соответственно, мм.

Здесь

$$H_k - h_k^{cg} \approx \frac{b+c}{2 \cdot b+c} \cdot b \cdot \sin \alpha_k,$$

где b, c – ширина полки и дна профиля соответственно, мм; α_k – угол подгибки полки профиля на текущем переходе, град.

В формуле (3.93) величина t_k^* определяется следующим образом:

$$t_k^* = \frac{1}{E} \cdot \frac{ds_k}{de_k} \Big|_{cr}, \quad (3.94)$$

где σ_k, e_k – действующее напряжение и соответствующая ему деформация.

Приняв закон степенного упрочнения в форме

$$s_k = K \cdot e_k^n, \quad (3.95)$$

где K, n – константы материала, подставим соответствующие значения величин из формул (3.95) и (3.94) в правую часть формулы (3.93).

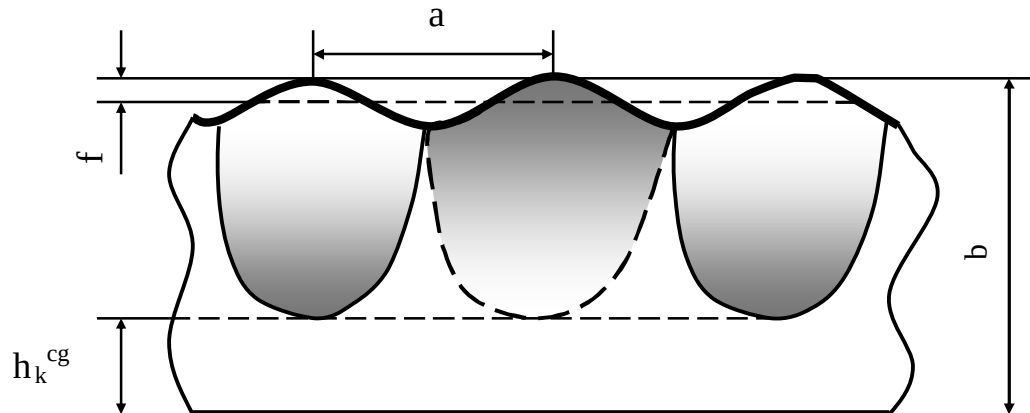


Рис. 3.27. Потеря устойчивости полки

Несложные преобразования приводят к выражению критической деформации полок:

$$e_k^{cr} = \left[(k^* \cdot l)^2 \cdot \frac{n \cdot E}{K} \cdot \left(\frac{s}{H_k - h_k^{cg}} \right)^4 \right]^{\frac{1}{n+1}}, \quad (3.96)$$

где $l = \frac{p^2}{12 \cdot (1 - m^2)}.$

Надлежит отметить, что условие (3.96) дает выражение предельной деформации в закритической области, а потому $\mu = 0, 5$. Коэффициент, учитывающий условия закрепления краев пластин-полок (один край защемлен, дру-

гой – свободен), принято брать равным 1,277 [331], хотя некоторые авторы считают, что в закритической области значение этого коэффициента должно быть несколько выше (см., например, классический учебник Работнова Ю.Н. [279]). В данной работе принято среднее значение k по работам [331] и [279].

В случае потери устойчивости полки волнистость кромки (см. рис. 3.27) может быть описана в терминах отклонений $w(r, z)$ материальных частиц периферийных участков полки от плоскости пластически недеформированных участков по закону [377, 162]:

$$w(r, z) = f \cdot \frac{r - h_k^{cg}}{b - h_k^{cg}} \cdot \sin \frac{m \cdot p \cdot z}{a}, \quad (3.97)$$

где f – амплитуда волны на кромке, мм; r – текущая координата вдоль прямой, лежащей в плоскости полки и перпендикулярная линии профилирования, мм; m – число полуволн при потере устойчивости; z – текущая координата в направлении движения профиля ($z = x_3$), мм.

При потере устойчивости полки ее продольная деформация может быть подсчитана апостериори, если измерить амплитуду и шаг волны на кромке. В этом случае в формуле (3.97) следует положить $r = b$ и $m = 2$, а затем с использованием функции $w(r, z)$ произвести спрямление волны.

Спрявление синусоиды после несложных, но громоздких вычислений, приводит к следующему выражению:

$$J = \frac{2 \cdot a}{p} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot p \cdot f}{a} \right)^2} \cdot E\left(\frac{p}{2}, p\right), \quad (3.98)$$

где J – длина синусоиды на ее периоде; $E(p/2, p)$ – эллиптический интеграл второго рода при $0 < p^2 < 1$.

В формуле (2.51) параметр p определяется соотношением:

$$p = \sqrt{\frac{2 \cdot f^2 \cdot p^2}{a^2 + 2 \cdot f^2 \cdot p^2}}.$$

Зависимость продольной деформации кромки $\varepsilon_{кв}$, вычисленной на основе выражения (3.98), от амплитуды и шага волны представлена на рис. 3.28 в результате расчетов в среде MathCAD2001Pro. Значение остаточной продольной деформации, представленной на рис. 3.28, задавали соотношением:

$$e_{кв} = \ln\left(\frac{J}{a}\right) \cdot 100\% \quad (3.99)$$

где J определяется формулой (3.98). Как видно из рис. 3.28, остаточная деформация не зависит от ширины полки и угла подгибки, что обусловлено процедурой расчета, основанной на измерении геометрических параметров волны.

Уравнение (3.97) весьма хорошо согласуется с данными геометрических замеров при изготовлении швеллерных, корытных и С – образных профилей [201, 283, 284, 162], периферийные элементы которых подвергались локальной потере устойчивости (см. рис. 3.27). Формула (3.99) может использоваться как

верхняя оценка критических деформаций подгибаемых полок профиля.

Сопоставление приобретенной деформации полки e_k^f (формула (3.85)) и критической деформации e_k^{cr} (формула (3.96)) позволяет сформулировать критерий возникновения кромковой волнистости в следующем виде [162]:

$$I(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 1 \\ 1, & \text{при } x \geq 1 \end{cases}, \quad (3.100)$$

где $I(x)$ – индикаторная функция; ξ – отношение остаточной деформации полки к критической деформации (формула (3.96)), приводящей к локальной потере устойчивости полки по выходу профиля из роликового калибра.

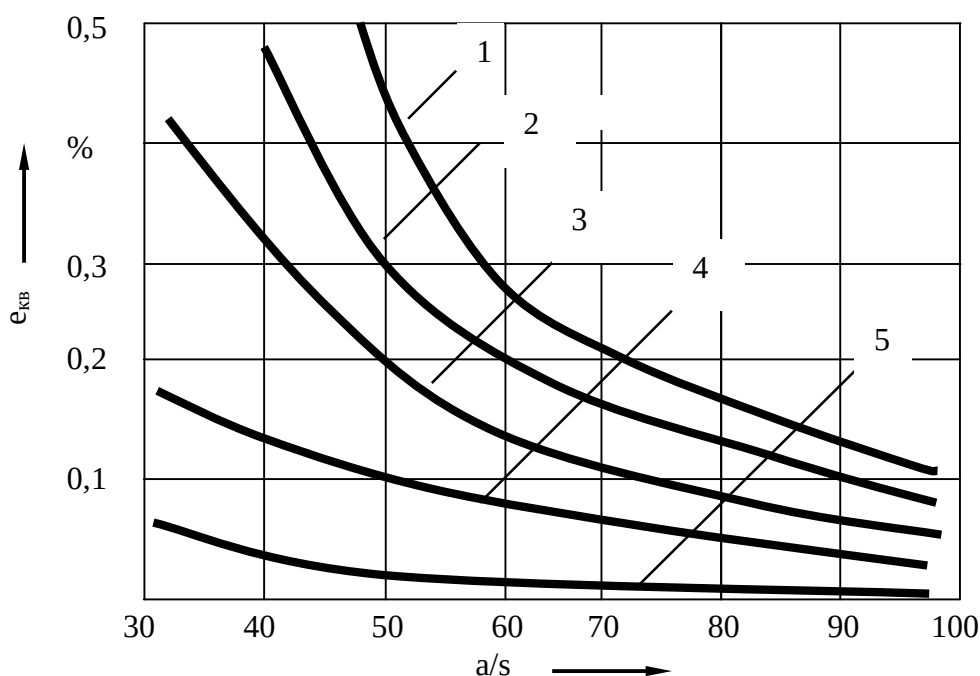


Рис. 3.28. Зависимость остаточной деформации на кромке от относительного шага a/s и амплитуды волны f при потере устойчивости: 1 – $f = 1,0$ мм; 2 – $f = 0,8$ мм; 3 – $f = 0,6$ мм; 4 – $f = 0,4$ мм; 5 – $f = 0,2$ мм

В формуле (3.100) индексация переходов условно опущена. Индикаторная функция может быть интерпретирована следующим образом: при $I(x) = 0$ кромковая волнистость отсутствует; при $I(x) = 1$ кромковая волнистость возникает. Функция (3.100) введена по аналогии с известной дельта-функцией Дирака в квантовой теории поля, однако способ ее задания существенно иной.

Зависимость критических деформаций от параметров профиля и механических свойств заготовки согласно формуле (3.97) представлены на рис. 3.29 и 3.30.

На рис. 3.31 изображены графики приобретаемых пластических деформаций полок e_k^f на основе формулы (3.85) и критических деформаций, приводящих к локальной потере устойчивости, в соответствии с формулой (3.96) для первого перехода. Единичные значения индикаторной функции на этом графике представляются точками пересечения графиков двух семейств, причем, об-

ласть допустимых деформаций располагается ниже соответствующей точки.

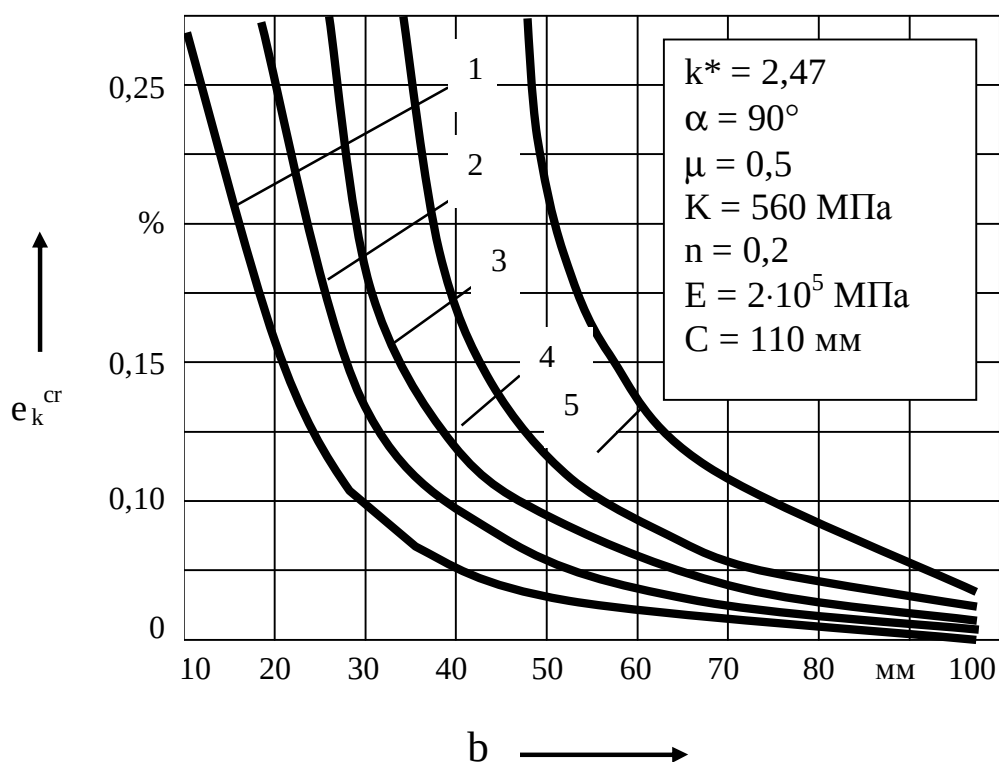


Рис. 3.29. Зависимость критической деформации от ширины полки и толщины стенок профиля: 1 – $s_0 = 0,6$ мм; 2 – $s_0 = 0,8$ мм; 3 – $s_0 = 1,0$ мм; 4 – $s_0 = 1,2$ мм; 5 – $s_0 = 1,5$ мм

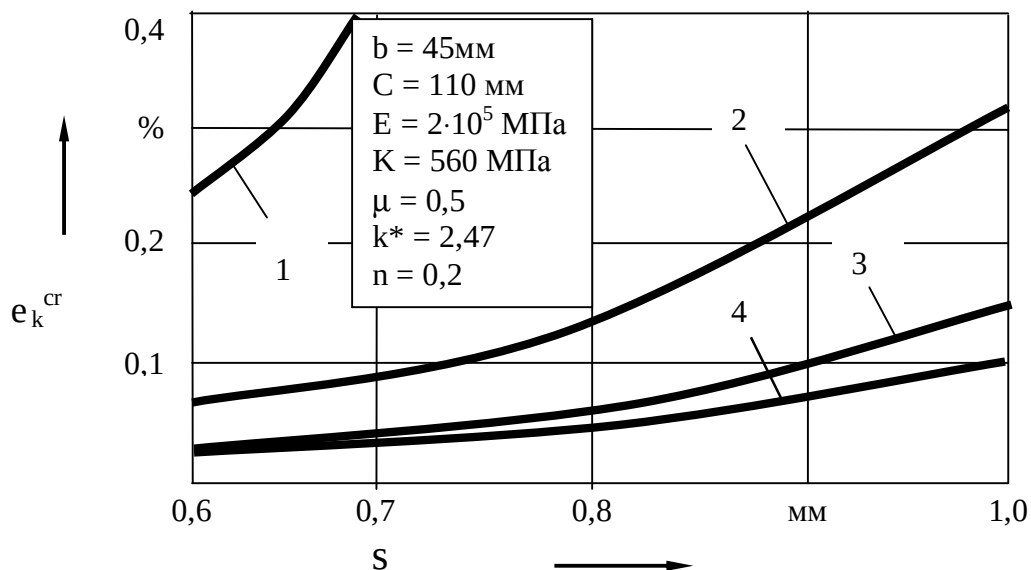


Рис. 3.30. Зависимость критических деформаций полок от толщины заготовки и текущего суммарного угла подгибки: 1, 2, 3, 4 – $\alpha = 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 90^\circ$ соответственно

номерность распределения деформаций полок по переходам и отсутствие кромковой волнистости в процессе формообразования профиля.

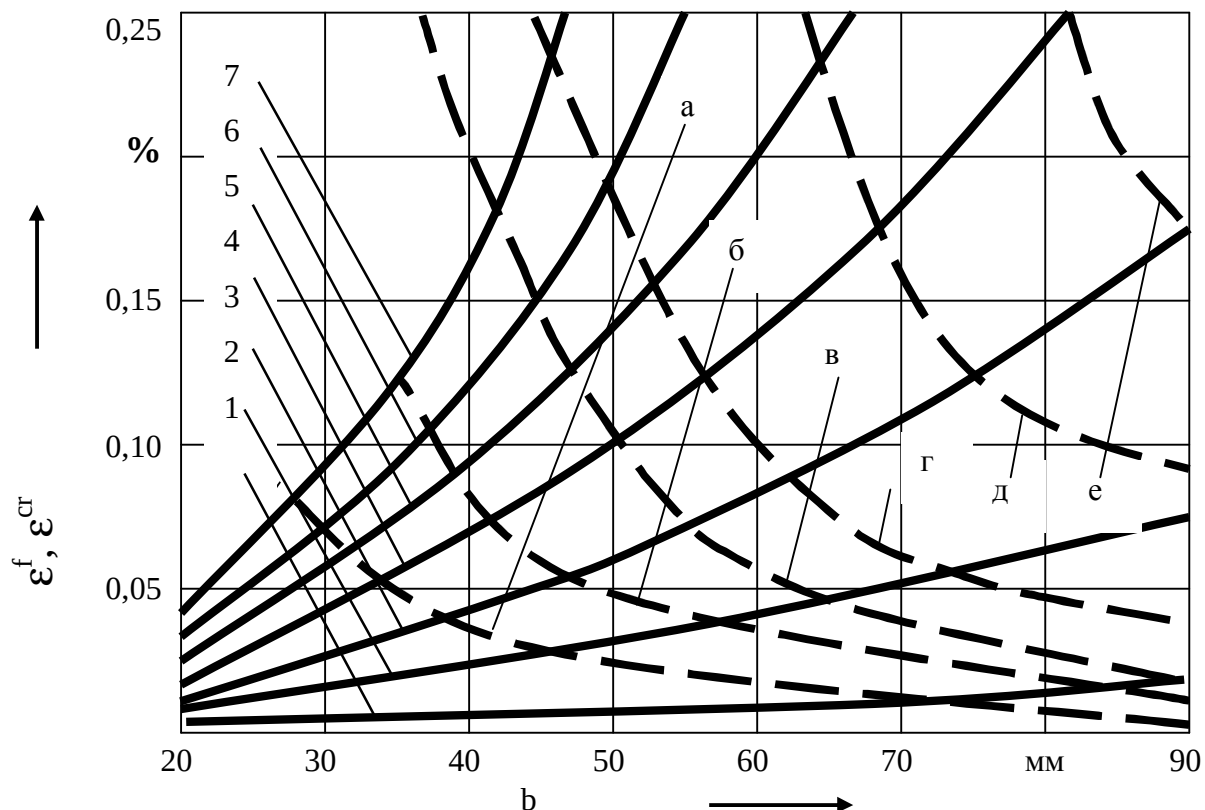


Рис. 3.32. Деформации на последнем переходе: — — — — — приобретенные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ соответственно; — — — — — критические: а, б, в, г, д, е — $S = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$ мм соответственно

На практике иногда оказывается, что критерий потери устойчивости не может быть выполнен для всех переходов. Этому случаю соответствуют ситуация, когда на станке с заведомо недостаточным числом клеток (для принятой процедуры проектирования и заданного типа профиля) необходимо, тем не менее, изготовить данный профиль. В этом случае процесс нуждается в корректировке: с переходов, где возможна кромковая волнистость, снимают по $(1 - 1,5)^\circ$ с углов подгибки и добавляют их в один из переходов, после которого устанавливают межклетьевые проводки. Применение межклетьевых проводок хотя и решает проблему, однако усложняет процесс настройки станка и отладки технологии. В связи с потерей устойчивости полок и оптимизацией углов подгибки возникает важный практический вопрос преемственности технологии производства узких профилей для изготовления профилей с широким дном и vice versa.

3.9. Учет эффектов прогиба донной части профиля

Большие углы подгибки полок за один переход приводят к относительно большим степеням деформаций подгибаемых полок, зависящим в значительной степени от размеров поперечного сечения профиля и параметров процесса его формообразования. Замечено, что формообразование профилей с продольными рифтами в донной части чаще приводит к потере устойчивости, чем формообразование профилей с гладким дном при прочих равных условиях.

Приложение момента сил к подгибаемой полке со стороны конических участков нижнего формирующего ролика (рис. 3.23) вызывает не только резкое изменение кривизны подгибаемой полки непосредственно перед входом в калибр, но и ряд других эффектов: кручение полки, поворот угловых элементов, выпучивание донной части заготовки, продольный прогиб заготовки в межклетьевом пространстве. Указанные эффекты до настоящего времени не получили систематического изучения, за исключением работы [201], где приведены экспериментальные данные по профилям с толщиной стенки 2...4 мм, освещающие геометрическую сторону дела без существенного анализа причин их возникновения. Данное обстоятельство объясняется слабой выраженностью обсуждаемых эффектов для толстостенных профилей с небольшой шириной подгибаемых полок (до 30 толщин материала заготовки), изготавливаемых на станах с достаточно большим числом задействованных клеток при режимах подгибки 5...10 градусов за переход.

С точки зрения технологии мелкосерийного производства указанные выше эффекты являются весьма значимыми для оптимизации процесса профилирования заготовки, поскольку, как будет показано ниже, имеется ряд возможностей влияния на проявления упомянутых эффектов.

Рассмотрим указанные выше три первых эффекта как наиболее важные, приняв следующие допущения:

- § материал заготовки принимается квазиизотропным в упругой области и дискретно (по переходам) упрочняющимся в контактной зоне;
- § продольный прогиб заготовки в межклетьевом пространстве не оказывает существенного влияния на другие эффекты ввиду его малости, так что угловые зоны можно считать подкрепляющими ребрами, являющимися абсолютно жесткими на изгиб в направлении нормали к плоскости дна профиля и имеющими малую жесткость в плоскостях, касательных к срединной поверхности;
- § передняя граница (в осевой плоскости текущего перехода) и задняя граница (начало зоны плавного перехода) выпученной донной части заготовки могут перемещаться только в горизонтальной плоскости;
- § зона выпучивания донной части заготовки простирается на длину зоны плавного перехода;
- § участки приложения момента кручения свободной уголковой зоны профиля и момента, преодолевающего сопротивление уголкового пластического шарнира в контактной зоне считаются совпадающими.

Межклетьевое пространство, предшествующее, например, k -ому переходу, может быть разделено на три зоны: зона стабилизации по выходу из пред-

существующего калибра L_{st}^k , зона плавного перехода L^k , контактная зона L_{con}^k (рис. 3.23). Далее рассматривается зона проявления указанных выше эффектов протяженностью L^k (рис. 3.33). Используем условие равновесия для момента сил относительно оси X_3 , аналогичное интегральному условию равновесия согласно работе [132]:

$$\int_A [\vec{r} \cdot \vec{s}^n]_{x_3} \cdot dA = 0, \Rightarrow \sum_{i=1}^n M_{x_3}^i = 0, \quad (3.101)$$

где $\vec{r}$ – радиус вектор; $\vec{s}^n$ – вектор напряжений; A – площадь поверхности выделенной части заготовки; $M_{x_j}^i$ – момент, соответствующий состоянию деформирования рассматриваемого элемента.

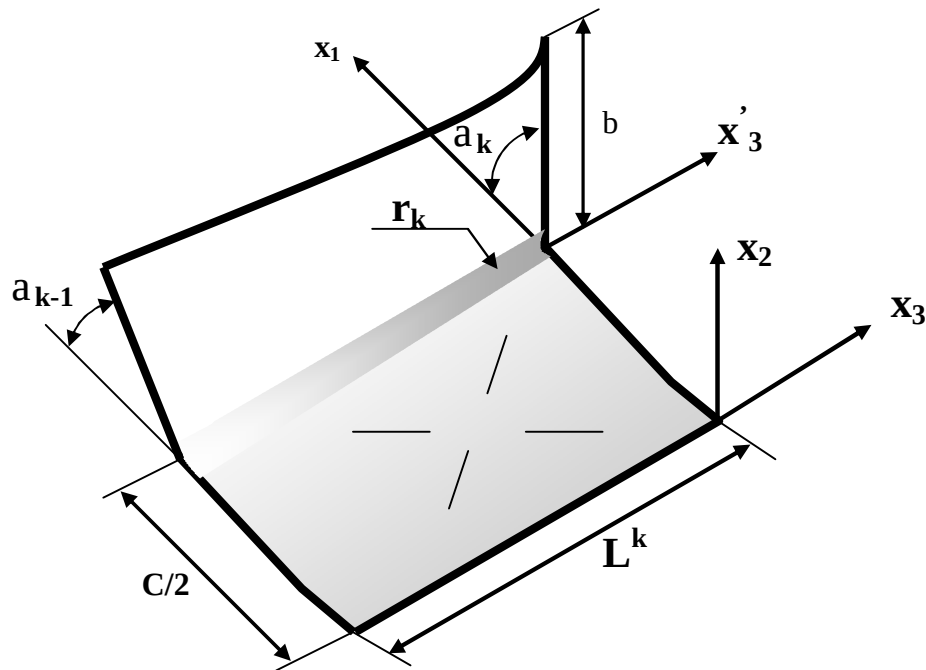


Рис. 3.33. Зона прогиба в межклетьевом пространстве

В контактной зоне k -го перехода подгибаемая полка прилегает к части конической поверхности нижнего формирующего ролика, деформируясь, и воздействует на зону плавного перехода L^k , вызывая эффекты деформирования полки и кручения уголкового зоны (ребра жесткости), а также прогиб донной части изготавливаемого профиля.

Опуская индексацию оси и вводя специальные обозначения для моментов внешних сил, условие (3.101) может быть представлено в следующем виде:

$$M_L^k - M_{ft}^k - M_{at}^k - M_b^k = 0, \quad (3.102)$$

где M_L^k – момент от перерезывающих сил в контактной зоне; M_{ft}^k – момент силы сопротивления деформированию полки; M_{at}^k – момент силы сопротивле-

ния кручению уголкового зоны; M_b^k – момент силы деформирования донной части профиля.

Момент M_L^k вычисляется на основе решения задачи деформирования заготовки в контактной зоне и представляется в следующем виде:

$$M_L^k = \frac{s_s \cdot s_0 \cdot (e_{k-1}^\Sigma)^n \cdot g}{2 \cdot z_k \cdot \sin^2(a_k)} \cdot \left[\frac{(1 + z_k)}{(z_k + 2)} \cdot \frac{[(R_f^k)^{z_k+2} - (R_0^k)^{z_k+2}]}{(R_f^k)^{z_k}} \right] - \sin^2(a_k) \cdot \frac{b^2}{2} - R_f^k \cdot \frac{[(R_f^k)^{z_k+1} - (R_0^k)^{z_k+1}]}{(R_f^k)^{z_k}}, \quad (3.103)$$

где s_s, n – характеристики материала заготовки; a_k – суммарный угол подгибки на k -ом переходе; R_0^k – радиус формующего ролика под базовым элементом (донной частью профиля); b, s_0 – ширина подгибаемой полки и ее толщина соответственно; a_k – угол контактной зоны; e_{k-1}^Σ – суммарная интенсивность логарифмических деформаций полки, приобретенных на предшествующих переходах.

Здесь $R_f^k = R_0^k + b \cdot \sin a_k$, а фактор z_k определяется соотношением:

$$z_k = u \cdot \operatorname{ctga}_k,$$

где n – коэффициент трения между заготовкой и поверхностью формующего ролика. В формуле (3.103) g является функцией коэффициентов анизотропии в соответствии с работой [281].

Момент силы сопротивления деформированию полки может быть определен на основе работы [365]:

$$M_{ft}^k = \frac{s_2 \cdot s_0 \cdot b^3}{6} \cdot \left[\frac{dq_k}{dx_3} \right]^2 \cdot L^k \cdot (e_{k-1}^\Sigma)^n, \quad (3.104)$$

где q_k – текущее значение угла подгибки в зоне плавного перехода; x_3 – декартова координата, совпадающая с осью профилирования.

Надлежит отметить, что момент M_{ft}^k нельзя вычислять на основе моделей упругого кручения, поскольку их применимость для диапазонов $b=20...70$ мм при $s_0 = 1$ мм, $\theta_k = 15^\circ$ для малоуглеродистых сталей дает предельное значение угла упругого кручения порядка 2° .

Для выявления характера влияния эффекта подгибки полок на прогиб донной части профиля, принимая во внимание последнее из сформулированных выше допущений, будем рассматривать участок базового элемента профиля (дно профиля) с размерами $L^k \times C$ в направлении координатных осей x_3 и x_1 соответственно. В дополнение к исходным допущениям примем, что при установившемся режиме профилирования кривизны донной части заготовки в продольном и поперечном направлениях постоянны.

Поскольку прогиб донной части ω не превышает $C/5$, то она может рассматриваться как пологая оболочка, для которой основные уравнения равновесия и совместности деформаций представляются в форме, предложенной Маргерром [276]:

$$\begin{aligned} \frac{D}{s_0} \cdot \nabla^4 w &= \Re(F, w) + \frac{8 \cdot M_b^k}{L^k \cdot C^2 \cdot s_0}; \\ \frac{\nabla^4 F}{E} &= -\Re \left[(w - w_0), \frac{1}{2}(w + w_0) \right]. \end{aligned} \quad (3.105)$$

где D – цилиндрическая жесткость оболочечного элемента; ω – текущий прогиб оболочки; Φ – функция напряжений; $\Re$ – дифференциальный оператор; w_0 – максимальный прогиб оболочки; E – модуль Юнга материала.

Граничные условия для краев оболочки вдоль координатных осей x_3 и x_1 задаются в виде:

$$w = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x_3^2} = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} = 0, s_3 = s_1 = 0, t_{13} = t_{31} = 0. \quad (3.106)$$

Для решения уравнений (3.105) с граничными условиями (3.106) применим метод Бубнова-Галеркина с использованием аппроксимирующих функций, зависящих от преобразованных координат x'_1, x'_3 :

$$w = w_0 \cdot \sin\left(\frac{px'_3}{L^k}\right) \cdot \sin\left(\frac{px'_1}{C}\right), \quad F = A \cdot \sin\left(\frac{px'_3}{L^k}\right) \cdot \sin\left(\frac{px'_1}{C}\right), \quad (3.107)$$

где A – амплитудное значение функции напряжений.

Отметим, что координатная привязка аппроксимирующих функций (3.107) условна: в формулах (3.107) систему координат следует считать локальной, привязанной к одному из углов выпученной части дна профиля (рис. 3.33). При необходимости переход в основную систему координат легко осуществляется с помощью соответствующих линейных преобразований координат.

Переходя к безразмерным параметрам, получим значения изгибающих моментов, действующих со стороны уголкового зоны на донную часть профиля:

$$M_b^k = \frac{E \cdot s_0^4}{8 \cdot L^k} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\frac{32 \cdot p^2 \cdot z^3}{9 \cdot (1 + 1/l)^2} - \frac{k \cdot p^2 \cdot z^2}{(1 + 1/l)^2} + \\ &+ \frac{1}{16} \left[\frac{k^2 \cdot p^2 \cdot z^2}{(1 + 1/l)^2} + \frac{p^6 \cdot (1/l + l)^2}{192 \cdot (1 - m^2)} \right] \cdot z \end{aligned} \right\}, \quad (3.108)$$

где k – приведенная кривизна донной части профиля; z – относительный прогиб; l – отношение протяженности выпученной части дна профиля к ширине его дна C ; m – коэффициент Пуассона.

Момент сопротивления кручению углового элемента профиля M_{at}^k складывается из момента сопротивления чистому кручению M_e^k и момента сопротивления пластического шарнира M_{pj}^k на участке в непосредственной близости от осевой плоскости ($L_{con} \ll L^k$):

$$M_{at}^k = M_e^k + M_{pj}^k, \quad (3.109)$$

где значения M_e^k и M_{pj}^k определяются зависимостями [378, 365]:

$$M_e^k = G \cdot J^k \cdot q_k / L^k, \quad (3.110)$$

$$M_{pj}^k = h \cdot s_2 \cdot s_0 \cdot (r_b^k + s_0 / 2) \cdot q_k' \cdot (e_{k-1}^\Sigma)^n \cdot i^k, \quad (3.111)$$

где G – модуль сдвига материала заготовки; J^k, i_k – момент инерции и радиус инерции угловой зоны соответственно, зависящие от радиуса зоны сгиба r_b^k [378]; q_k' – угол поворота пластического шарнира.

Для проверки выполнения условия (3.102) в среде MathCAD-2001 Pro были выполнены расчеты с использованием формул (3.103), (3.104), (3.108) – (3.111). Момент от перерезывающих сил обозначен за M_L , а суммарный момент сопротивления – за M_Σ . Предельный момент, соответствующий изгибу на длине L^k при схеме гибки на кромкогибе с поворотной траверсой обозначен за M_{ult} . Расчеты выполнены для стального профиля с шириной донной части 110 мм, при радиусегиба, равном двойной толщине заготовки. Коэффициент трения составляет величину 0,2; угол подгибки – около 12°. Расчеты показали (рис. 3.34) удовлетворительное выполнение равенства (3.102) с невязкой в несколько процентов (см. кривые «1» и «2»).

Угол поворота пластического шарнира q_k' в формуле (3.111) представляет собой угол поворота сечения зоны сгиба β , который, в свою очередь, может

быть получен из условия $\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{dw}{dx_1} = \operatorname{tg} b$ на одном из ребер жесткости в точ-

ке, удаленной от осевой плоскости текущего перехода на величину 2Δ (начало зоны интенсивного деформирования перед роликами). Тогда угол поворота пластического шарнира представляется следующей функцией:

$$q_k' = \operatorname{arctg} \left\{ k \cdot \bar{C} \cdot \bar{b} \cdot p \cdot \sin \left[p \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot D}{L^k} \right) \cdot \frac{J_0}{J} \right] \right\}, \quad (3.112)$$

где k – коэффициент эмпирической зависимости прогибов дна профиля от размерных параметров его поперечного сечения; $\bar{C}, \bar{b}$ – относительная ширина донной части профиля и подгибаемой полки; J_0, J – моменты инерции, гладкой полки и полки с элементами жесткости относительно оси, проходящей через центр масс донной части профиля и параллельной координатной оси x_1 , соответственно.

В формуле (3.112) выражение $\left(1 - \frac{2 \cdot D}{L^k}\right) \cdot \frac{J_0}{J}$ соответствует отношению $\frac{x_3'}{L^k}$ в формуле (3.107), причем максимальный прогиб w_0 задан формулой, полученной обработкой эмпирических данных по профилям (см. разд. 4):

$$w_0 = k \cdot \left(\frac{C}{s_0}\right)^2 \cdot b. \quad (3.113)$$

Величина Δ в формуле (3.112) определяется геометрическим соотношением:

$$\Delta = \left\{ \frac{q_k \cdot [2 \cdot R_0^k \cdot b + b^2 \cdot (\sin a_k + \sin(a_k - q_k))]}{[\sin a_k - \sin(a_k - q_k)]} \right\}^{1/2}. \quad (3.114)$$

В том случае, когда донная часть заготовки обладает высокой жесткостью (узкий профиль или наличие рифтов на базовом элементе), уголковая зона может переходить в пластическое состояние с изменением радиуса кривизны зоны сгиба на участке перед осевой плоскостью. Оценка протяженности данного участка $\chi(b, s_0, r)$ может быть получена из следующих соображений. Момент сил M_{at}^k имеет своим верхним пределом значение момента при пластическом изгибе (с изменением радиуса сопряжения дна и подгибаемой полки профиля).

Соотнесение указанных моментов определяет протяженность участка с пластическим состоянием уголковой зоны:

$$C = \frac{4 \cdot M_{at}^k}{s_m \cdot s_0^2}.$$

На основании последнего соотношения с учетом формулы (3.109) и результатов работы [365], на рис. 3.34 построены графики протяженности зоны плавного перехода и протяженности пластической уголковой зоны (рис. 3.35). Протяженность пластической зоны угла не превышает 25 % от протяженности зоны плавного перехода (см. рис. 3.35), что также согласуется с результатами экспериментальных исследований других авторов [201]. Приведенная в данном разделе модель описана в наших работах [379, 344], где дается номограмма для

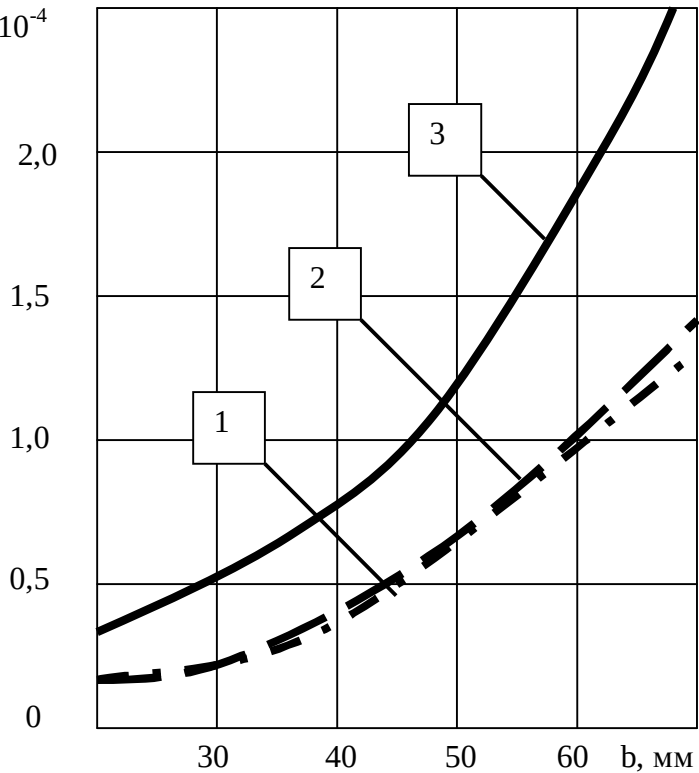


Рис. 3.34 Равенство моментов по формуле (3.102): 1 – M_{ult}^k ; 2 – M_L^k ; 3 – M_{Σ}^k

определения углов «ослабления», которая применяются при проектировании технологической оснастки (см. также разд. 4 настоящей работы). Однако в

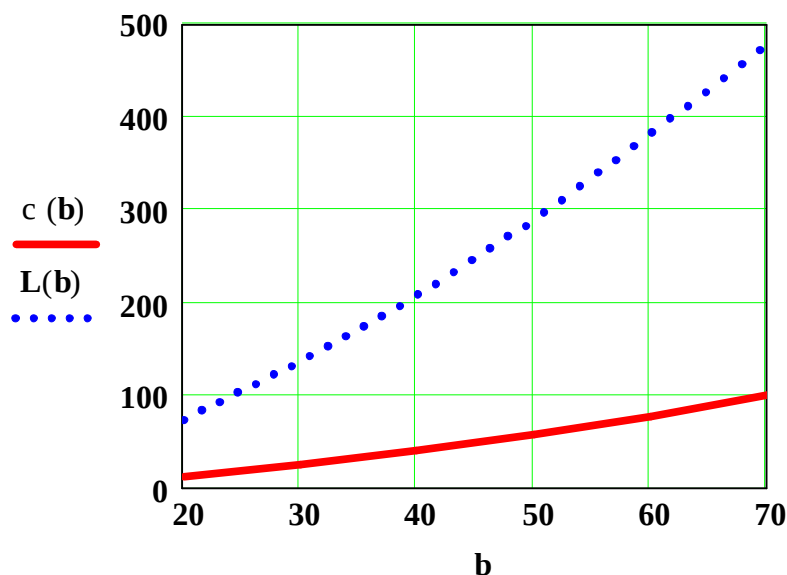


Рис. 3.35. Соотношение протяженности пластической уголкового зоны и зоны плавного перехода

практике последних лет нередко встречаются случаи разработки технологии производства профилей с гофрами жесткости в широкой донной части. Последовательная формовка гофр резко увеличивает число переходов, а одновременная их формовка в каждом из переходов связана с ограничениями и особенностями, которые обсуждаются ниже.

3.10. Условия формовки гофр в донной части профиля

Формовка гофр в донной части широких профилей во многом аналогична формовке гофрированных панелей в роликах. Правда, панели для авиационных конструкций производят традиционно двумя основными способами: формованием листовой заготовки эластичной средой по стальному форм-блоку [105] и формованием в свинцово-цинковых штампах со стальной матрицей и свинцово-цинковым пуансоном [380]. Однако при использовании этих способов имеет место недоштамповка гофр по высоте, которая может достигать для высокопрочных материалов 2 мм (при толщине заготовки 2,0...2,5 мм и высоте гофра 25..30 мм). Кроме того, стойкость свинцово-цинкового пуансона весьма низка и составляет порядка 10 изделий. Еще одним недостатком применения штамповки является небольшая длина получаемых профилей, а при штамповке в передвижку на гофрах возникают так называемые зоны перекрытия, уменьшающие ресурс изделия. Изготовление же штампов из высокопрочных инструментальных материалов резко увеличивает их стоимость, усложняет проблему их хранения и транспортировки при запуске в производство очередной партии деталей.

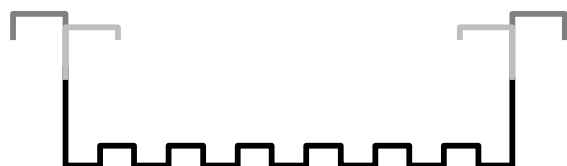


Рис. 3.36. Сечение профиля с широким гофрированным дном

Альтернативой штамповки может выступать изготовление гофрированных панелей методом стесненного изгиба в роликах. Аналогичный подход может быть применен и для производства широких профилей с гофрами в донной части (рис. 3.36), основанный на интенсификации про-

цесса формообразования на предварительных переходах с окончательной формовкой методом стесненного изгиба, т.е. непосредственной осадкой волнообразной заготовки в окончательную конфигурацию гофра [381]. Особенность состоит в том, что одновременное формообразование заготовки по переходам вызывает утонение заготовки на каждом из переходов вследствие перетяжки, что является ограничением данного процесса.

Пусть конфигурация требуемого гофра будет представлена сечением, изображенным на рис.3.37. Исходя из условия плоского деформированного состояния и несжимаемости материала заготовки, можно найти ширину заготовки, приведенную к одному гофру:

$$B_3 = l_1 + l_2 + \frac{2(H - S_0)}{\cos \alpha} + (r_1 + r_2 + S_0) \left[\frac{p}{2} - a - 4 \operatorname{tg} \left(\frac{p}{2} - \frac{a}{2} \right) \right] - 2S_0 \operatorname{tg} \left(\frac{p}{4} - \frac{a}{2} \right) + \Delta_\phi \quad (3.115)$$

где l_1, l_2 – ширина верхней и нижней стенок соответственно; H – высота гофра; S_0 – толщина стенок гофра; α – угол между боковой стенкой и вертикалью; r_1, r_2 – внутренние радиусы сопряжения верхней и боковой стенки, нижней и боковой стенки соответственно; $D_{\text{лб}}$ – дополнительная величина к ширине к теоретической заготовки, учитывающая заполнение уголковых зон и аксиальную вытяжку.

Величина $D_{\text{лб}}$ в формуле (3.115) может определяться аналитически или экспериментально и зависит от требований к утолщению в уголковой части, от используемого материала и схемы предварительного формообразования. Так как величина Δ_ϕ не оказывает влияния

на течение процесса формообразования на предварительных переходах, то ограничимся лишь указанием диапазона ее значений. При стесненном изгибе величина Δ_ϕ находится в следующем диапазоне значений:

$$\Delta_\phi = (0,1 \dots 0,8) S_0 n, \quad (3.116)$$

где n – число зон сгиба гофра.

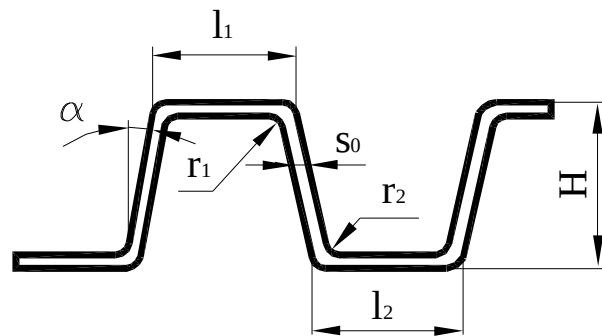


Рис. 3.37. Конфигурация окончательного гофра

Задавая число гофров N и принимая во внимание формулу (3.115) с выбранным значением Δ_j из диапазона значений, даваемых выражением (3.116), получим требуемую величину ширины заготовки $N \cdot B_3$.

Рассмотрим схему формообразования на предварительных переходах, которая реализуется вдавливанием роликов в заготовку на глубину Δh_j на j -ом

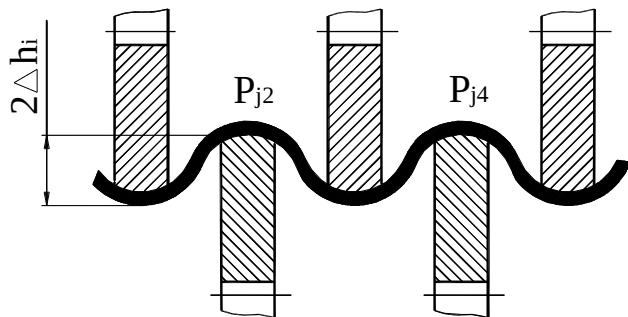


Рис. 3.38. Вдавливание роликов на предварительном переходе

переходе (рис. 3.38). При вдавливании роликов в плоскую заготовку происходит деформирование ее и перетяжка через ролики при наличии сил трения, что может приводить к утонению заготовки. Для выявления закономерностей, связанных с распределением утонения по поперечному сечению гофрированного профиля, рассмотрим следующие задачи. Во-первых, установим систему уравнений для

сил, действующих на элементы гофрированного профиля, и представим ее в виде рекуррентных соотношений, дающих возможность определять силы, действующие на любой из роликов того или иного перехода. Во-вторых, определим необходимые геометрические соотношения, в том числе площадь контакта ролика и заготовки на каждом из переходов; в-третьих, решим задачу равновесия заготовки с соответствующими предложениями о форме роликов при задании условий контакта заготовки и инструмента, получаемых из рекуррентных соотношений для сил и геометрических соотношений для площадей; в-четвертых, определим компоненты скорости деформирования с использованием результатов решения задачи равновесия заготовки, а затем найдем разность приращений внутреннего и наружного радиусов, а следовательно, утонение заготовки по сечению [278].

Обозначим силу, действующую на j -й ролик на i -ом переходе через P_{ji} , а

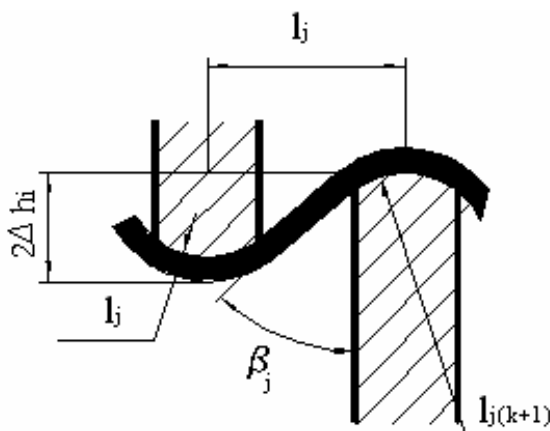


Рис. 3.39. Схема предварительного вдавливания роликов

геометрические характеристики – согласно рис.3.39. Следует иметь в виду, что

конфигурация роликов предварительных переходов может быть весьма прихотливой (например, образующей рабочей части роликов может быть участок цепной линии или локона Аньези). Поэтому из соображений простоты изготовления инструмента в качестве образующей рабочей части инструмента можно взять дугу окружности радиусом r_{ik}

для k -го ролика j -го перехода. При этом для наиболее простого случая периодического гофра с различными длинами верхней и нижней стенок имеет место соотношение:

$$r_{jk} = r_{j(k+2)}. \quad (3.117)$$

Формула (3.117) носит частный характер. Вообще же, радиус может быть одним и тем же для всех роликов переходов. Из геометрических соотношений определим угол между прямолинейным участком заготовки горизонталью на i -ом переходе:

$$b_j = \arcsin \frac{r_{jik} + r_{ij(r+1)}}{\sqrt{l_j^2 + (r_{j(K+1)} - Dh_j)^2}} - \arccos \frac{l_j}{\sqrt{l_j^2 + (r_{j(k+2)} - Dh_j)^2}}, \quad (3.118)$$

Угол b_i между прямолинейным участком заготовки и горизонталью для данного перехода считается одинаковым при всех сочетаниях роликовых пар. Это справедливо лишь для случая, когда гофр является периодическим и выполняется условие (3.117). В более общем случае угол b_i будет зависеть от конфигурации предварительного перехода и находиться из трансцендентного уравнения:

$$2(r_{j-1} \cdot b_{j-1} - r_j \cdot b_j) = \frac{l_{j-1}}{\cos b_{j-1}} - \frac{l_j}{\cos b_j} + 2\left(\frac{r_j \cdot \operatorname{tg} b_j}{\cos b_j} - \frac{r_{j-1} \cdot \operatorname{tg} b_{j-1}}{\cos b_{j-1}}\right).$$

Выражение для угла b_i будет использовано при составлении системы уравнений для действующих внешних сил.

Предварительно найдем усилие, потребное для переформовки участка заготовки при вдавливании ролика на глубину Δh_j . Формула для вычисления работы пластического формоизменения на единицу длину заготовки [317] имеет вид:

$$W = \frac{1}{4} \cdot s_T S_0^2 b_{ji},$$

где s_s – предел текучести материала.

Тогда средняя сила формообразования определяется таким образом:

$$P_{j0} = \frac{s_s \cdot S_0^2 \cdot b_j \cdot z_j}{2 \cdot Dh_j}, \quad (3.119)$$

где z_i – протяженность зоны контакта инструмента и заготовки, определяемая по формуле:

$$z_j \approx 2\sqrt{2R_j Dh_j - Dh_j^2}; \quad (3.120)$$

R_j – радиус формующего ролика j -го перехода;

$$Dh_i = h_i - h_{i-1} = 2r_i(1 - \cos b_i) - 2r_{i-1}(1 - \cos b_{i-1} + \operatorname{tg} b_i(l_i - 2r_i \sin b_i) - \operatorname{tg} b_{i-1}(l_{i-1} - 2r_{i-1} \sin b_{i-1})). \quad (3.121)$$

сколькx заниженное значение контактного давления в определенной степени будет компенсировать ошибку, проистекающую из-за данного допущения. Уравнение равновесия для контактной зоны можно записать в виде:

$$\frac{ds_{ji}^r}{dr} + \frac{s_{ji}^r - s_{ji}^q}{r} = 0, \quad (3.124)$$

где s_{ji}^r, s_{ji}^q – радиальные и тангенциальные напряжения соответственно, r – текущий радиус кривизны.

Условие пластичности представим в упрощенном виде:

$$s_{ji}^r - s_{ji}^q = c s_s, \quad (3.125)$$

где $c = \text{sign}(r - r_{ji}^n)$; где r_{ji}^n – радиус нейтрального слоя.

Решая уравнения (3.124) и (3.125), получим:

$$s_{ji}^r = c s_s \ln r + c, \quad (3.126)$$

где c – константа, подлежащая определению.

Граничные условия для решения (13) записываются в виде :

$$s_{ji}^r = \begin{cases} -q_{ji} & , r = r_{ji} \\ 0 & , r = \tilde{R}_{ji} \end{cases} \quad (3.127)$$

где $\tilde{R}_{ji}$ – радиус кривизны наружного контура зоны сгиба.

Учитывая значение функции c , из решения (3.126) и граничных условий (3.127), найдем величины напряжений в растянутой и сжатой зонах. Отметим, что окружная компонента на нейтральном слое испытывает скачок, в то время как радиальная компонента s_{ji}^r удовлетворяет условиям непрерывности. Таким образом, радиус нейтрального слоя r_{ji}^n легко определить из условия сшивания решения на границе зон растяжения и сжатия:

$$r_{ji}' = [r_{ji} \tilde{R}_{ji} \exp(-q_{ji} / s_s)]^{1/2}. \quad (3.128)$$

Перейдем теперь к деформационным характеристикам. Компоненты скорости, совместимые со значениями девиатора тензора напряжений, построенного на основе решения (3.126), определим по формулам [4]:

$$J_{ji}^r = -\frac{1}{2j} \left(r + \frac{r_{ji}^{H^2}}{r} \right), \quad J_{ji}^q = r \frac{q}{j}, \quad (3.129)$$

где J_{ji}^r, J_{ji}^q – скорости в радиальном и тангенциальном направлениях соответственно; j – величина угла гибки; q – текущий угол.

С учетом соотношений (3.129) найдем приращения радиусов:

$$\frac{dr_{ji}}{dj} = -\frac{1}{2j} [r_{ji} + \tilde{R}_{ji} \exp(-q_{ji} / s_s)], \quad \frac{d\tilde{R}_{ji}}{dj} = -\frac{1}{2j} [\tilde{R}_{ji} + r_{ji} \exp(-q_{ji} / s_s)].$$

Из последних двух выражений с учетом формулы (3.128) получим величину изменения толщины заготовки:

$$\frac{dS_{ji}}{dj} = -\frac{S_{ji}}{2j} [\exp(-q_{ji} / s_s) - 1], \quad (3.130)$$

откуда следует, что утонение не происходит на периферийной части заготовки ($dj = 0$), а также в отсутствие контактных давлений ($q_{ji} = 0$).

В формуле (3.130) приращение угла и сам угол можно рассматривать как текущее и конечное значение параметра. Эта формула может также служить в качестве исходной для определения допустимого числа гофров, которое можно изготавливать по данной схеме. В данном случае требуется дополнительное условие, ограничивающее величину утонения заготовки:

$$\left\{ \sum_{j=1}^k dS_{ji} / S \right\} \leq d, \quad (3.131)$$

где d – предельно допустимое утонение, отнесенное к толщине заготовки для данного вида материала; k – число предварительных переходов.

В неравенстве (3.131) левая часть содержит множество суммарных относительных утонений, которые получаются из формулы (3.130) при неявном предположении, что материал неупрочняемый. Фактически же большинство сплавов упрочняется, потому показатель экспоненты в формуле (3.130) должен уменьшаться. Следовательно, фактические значения утонения должны быть несколько меньше расчетных, хотя погрешность, возникающая из-за данного допущения, может компенсироваться за счет осреднения радиального давления, а также вследствие других допущений, принятых при разработке модели (например приближенное значение z_i).

Очевидно, наибольшее утонение будет в центральной части заготовки, т. е. при $i = N + 1$. Левая часть неравенства (3.131) представляет собой множество значений суммарного относительного утонения, которые должны быть меньше предельного допустимой величины утонения d . В этой связи условие (3.131) можно заменить на более частное условие, учитывающее принятую схему формообразования:

$$\sum_{j=1}^k dS_{j(N+1)} / S_0 \leq d. \quad (3.132)$$

Однако в этом случае значение N неизвестно, а потому формула (3.132) может быть положена в основу вычисления числа гофров на ЭВМ. При этом задаются все необходимые данные для вычисления утонения, а затем происходит сравнение фактического и допустимого утонения при отсчете числа роликов (или циклов итераций). Номер цикла итераций, при котором удовлетворяется условие равенства (в пределах заданной точности) объявляется искомым и отождествляется с допустимым числом гофров.

Заметим, что условие (3.132) нельзя применять для таких схем, где формообразование осуществляют последовательно, начиная с краев заготовки. В

этом случае надлежит производить корректировку системы (3.122) и изменять условие (3.132).

На рис. 3.40 приведен график распределения утонения по трансверсальному сечению заготовки перед окончательным переходом для случая конкретной конфигурации и числа гофров, взятых равным шести. Для проверки адекватности разработанной модели реальному процессу применительно к той же конфигурации производилось предварительное формообразование заготовки под прямоугольные гофры высотой 20 мм с шириной стенки 24,4 мм и шагом 50 мм. Материал заготовки: сплав Д16 толщиной 1,2 мм. Предварительная конфигурация получалась последовательным формованием за три перехода.

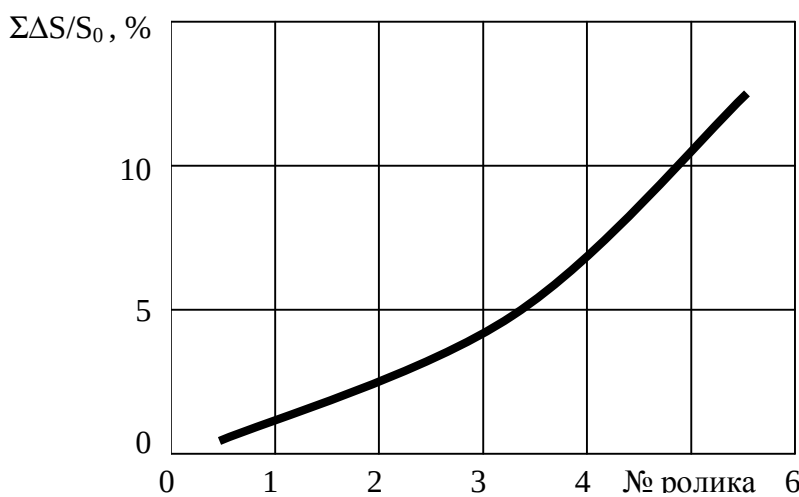


Рис. 3.40. Зависимость утонения от номера ролика (номера гофра при отсчете от среднего)

Расчетные зависимости утонения отличаются от экспериментальных не более, чем на 15...20 % (измерения проводили в вершинных точках волн).

График, приведенный на рис. 3.40, также можно использовать для определения допустимого числа гофров, получаемых в рамках данной схемы при известном ограничении на величину допустимого утонения. Отложив по оси ординат величину допустимого утонения d_{oon} , а затем, найдя проекцию точки пересечения перпендикуляра, восстановленного в точке d_{oon} , с кривой на оси абсцисс, получим число гофров, которое можно формовать.

Таким образом, построенная модель гофрообразования позволяет определять число гофров, которое можно формовать в рамках данной схемы, в зависимости от заданных геометрических характеристик конфигурации профиля гофра и механических свойств заготовки. Кроме того, модель позволяет прогнозировать распределение утонения гофров в процессе формообразования и может быть использована в системах автоматизированного проек-

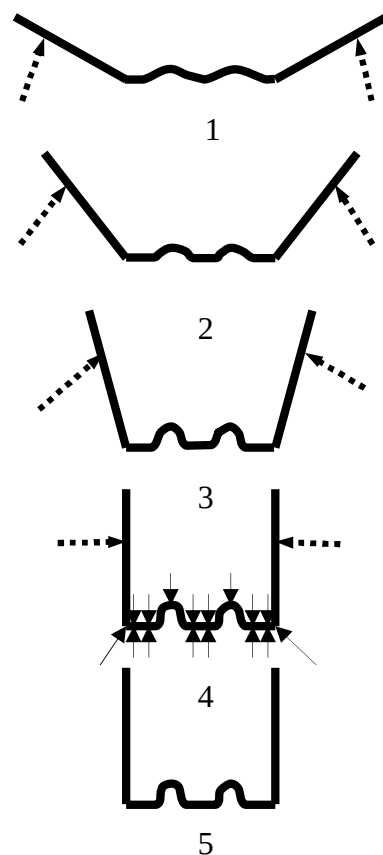


Рис. 3.41. Схема формообразования профиля с гофрами в донной части

тирования технологической оснастки для процессов формообразования длинномерных гофров.

Рассмотренный с теоретической точки зрения вопрос имеет важное прикладное значение. В работе [207] предложен способ гибки профиля с гофрами жесткости с их формовкой на предпоследнем переходе с целью предотвращения трещинообразования у основания гофр и предотвращения кромковой волнистости. Однако при производстве широких профилей этот способ характеризуется большим числом переходов, в то время как трещинообразование у основания гофр можно предотвратить за счет создания сжато-напряженного состояния в очаге деформации.

На основе приведенной модели формовки гофр нами разработан способ производства профилей [382] (патент № 2220802 от 2004 г.), в котором схема формообразования предусматривает одновременную формовку гофр (рифтов) на предварительных переходах с их осадкой в предпоследнем переходе и калибровкой профиля в последнем переходе. При этом к полкам прикладывают скользящую силу в межклетьевом пространстве. Способ апробирован и внедрен на ряде предприятий Российской Федерации.

3.11. Число переходов при интенсивном деформировании

Число переходов в технологии стесненного изгиба было определено в п. 3.4. данного раздела. При разработке технологии производства гнутых профилей МИД возникают два важных вопроса: 1) о возможности переноса закономерностей деформирования профилей одних типоразмеров на профили других типоразмеров; 2) об определении потребного числа переходов для производства профиля заданного типоразмера [383].

Первый вопрос связан с проблемой подобия в профилировании, затронутой в работе [384]. Второй вопрос решается обычно на основании предшествующего опыта разработчиков и зачастую указывается лишь достаточно широкий диапазон значений числа переходов для профилей определенного типа. Это существенно осложняет формализацию процесса проектирования технологической оснастки для формообразования профиля в роликах. В первом разделе книги рассмотрены различные подходы к определению числа переходов [336, 326], а также их недостатки.

Рассмотрению подлежат уголкового, швеллерные, корытные и С – образные профили с толщиной стенки до 1,5 мм. В работе [383] предпринята попытка построения зависимости числа переходов от геометрических параметров профиля и характеристик применяемого оборудования для вышеуказанных типов профилей в виде:

$$N = K \cdot C_{\text{rf}}, \quad (3.133)$$

где N – число переходов; K – коэффициент идентификации типа профиля; C_{rf} – критерий подобия.

Критерий подобия в формуле (3.133) учитывал геометрию сечения профиля и параметры оборудования. Хотя в целом модель дала неплохие результаты в процессе тестирования, однако введение конструктивного ограничения на радиусыгиба, назначение самого коэффициента формы из

условий осреднения его значений по группам однотипных профилей вызывает определенное неудовлетворение. Кроме того, предложенный критерий подобия работает удовлетворительно лишь в весьма узком диапазоне геометрических параметров сечения профиля и не в полной мере отвечает требованию мультипликативности параметров [385]. Преимуществом этой модели перед моделью работы [326] было включение ряда дополнительных факторов: угла и радиусагиба, толщины заготовки, характеристик оборудования и оснастки. Коэффициент формы был безразмерным в отличие от модели Киути [326], где он имел размерность площади или длины в зависимости от типа профиля. Впрочем, различие технологии и применяемого оборудования в этих двух моделях не допускает взаимного переноса результатов.

С учетом указанных недостатков разработана новая полуэмпирическая модель для определения числа переходов [344] :

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos \alpha)}{L_M \cdot n} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_g \cdot s}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.134)$$

где F – функция формы; L_M – межклетьеовое расстояние профилегибочного станка, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм; α – суммарный угол подгибки боковых полок, град; C – ширина дна профиля, мм; R – средний радиусгиба, соответствующий 95% уровню охвата зоны сгиба пластическими деформациями, мм; r_g – внутренний радиус зоны сгиба, мм; s – толщина заготовки, мм; n – число зон сгиба профиля.

Функция (3.134) построена на основе статистического анализа выборок из журналов технологической отработки 13 угольных, 51 швеллерных, 62 корытных и 77 С – образных профилей (отбор представительных конфигураций производился на основе базы данных, включающей более 500 типоразмеров гнутых профилей). Анализ проводился на основе частных параметрических моделей по каждому типоразмеру с последующей гибридизацией результатов. Выборки включали профили с диапазонами геометрических параметров сечения профиля и применяемого оборудования, приведенными в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Диапазоны варьирования параметров в выборках

№	Наименование параметра, его размерность	Диапазон изменения	Примечания
1	b , мм	20 – 60	
2	C , мм	28 – 210	
3	g , мм	5 – 30	
4	s , мм	0,5 – 1,5	
5	r , мм	0,6 – 2,0	
6	α , град.	75 – 90	
7	L_M , мм	220 – 600	Станки: ГПС-200М ($L_M = 220$ мм); ГПС-300М6 ($L_M = 400$ мм); ГПС-500М8 ($L_M = 400$ мм).

В формуле (3.134) первый сомножитель в квадратных скобках отражает влияние формы дна заготовки профиля, второй – степень «стеснения» заготовки, третий – жесткость угловой зоны. Функция формы F определяется соотношением:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{A}{A'}, \quad (3.135)$$

где A – площадь фигуры, охватываемой контуром сечения профиля и линией соединения кромок, мм²; A' – площадь фигуры, построенной на отрезке дна профиля и отрезке, соединяющем кромки профиля, мм².

Рис. 3.42 дает представление об определении площадей A и A' для четырех типов профилей. Для тех же типов профилей функцию формы можно задать единой обобщенной формулой:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{C + b \cdot \cos \alpha}{C + b \cdot \cos \alpha \pm g}, \quad (3.136)$$

где g – ширина горизонтальных полок профиля, мм, причем, знак «+» относится к профилю корытного типа, а знак «–» – к С-образному профилю.

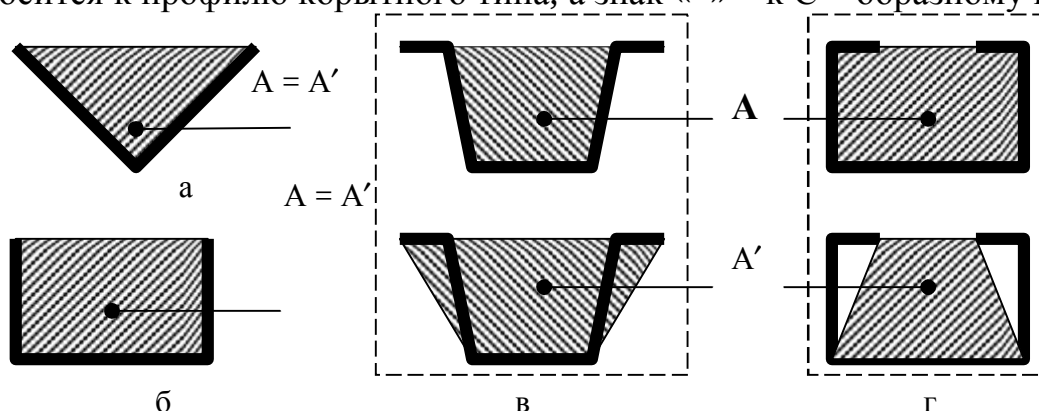


Рис. 3.42. К определению площадей фигур для вычисления функции формы:
а – уголкового профиля; б – швеллерный профиль; в – корытный профиль;
г – С-образный профиль

В формуле (3.136) коэффициент 3,2 получен калибровкой формулы (3.134) на массиве экспериментальных данных при сквозной прогонке модели по ширине полки. Функции формы для профилей различных конфигураций, построенные на основе формулы (3.136), изображены на рис. 3.43.

Обработку результатов, анализ и тестирование модели проводили в среде MathCAD – 2001 Pro. Результаты тестирования показали, что с увеличением ширины полки увеличение межклетьевого расстояния приводит к уменьшению числа переходов от 0,3 до 1 при изменении ширины полки от 20 до 90 мм при фиксированных значениях других параметров в пределах диапазона, определяемого табл. 3.3. Влияние суммарного углагиба примерно в полтора раза слабее в сравнении с предыдущим случаем. Для более наглядной иллюстрации подобных соотношений на рис. 3.44 и рис. 3.45 приведены

зависимости числа переходов от толщины заготовки и ширины дна соответственно при изменении величины «b» в пределах всего диапазона. Характер графиков с ростом величины «b» имеет тенденцию к увеличению и последующей стагнации, что соответствует данным производственного опыта.

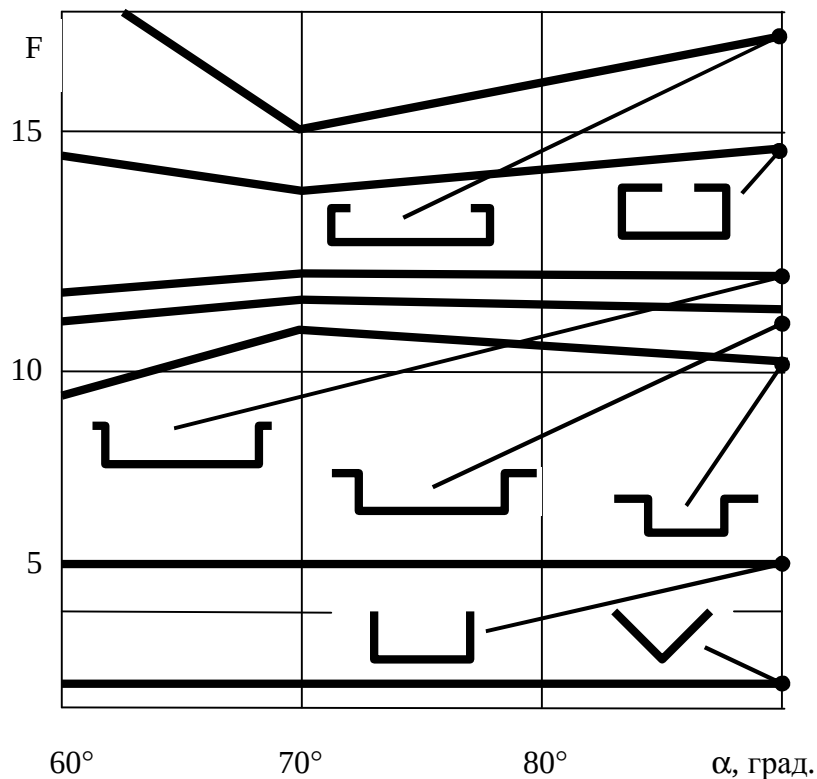


Рис. 3.43. Значения функции формы профиля

При случайной выборке в объеме 25 % от исходной, различие предсказанного и практического значения числа переходов не превышало 0,4.

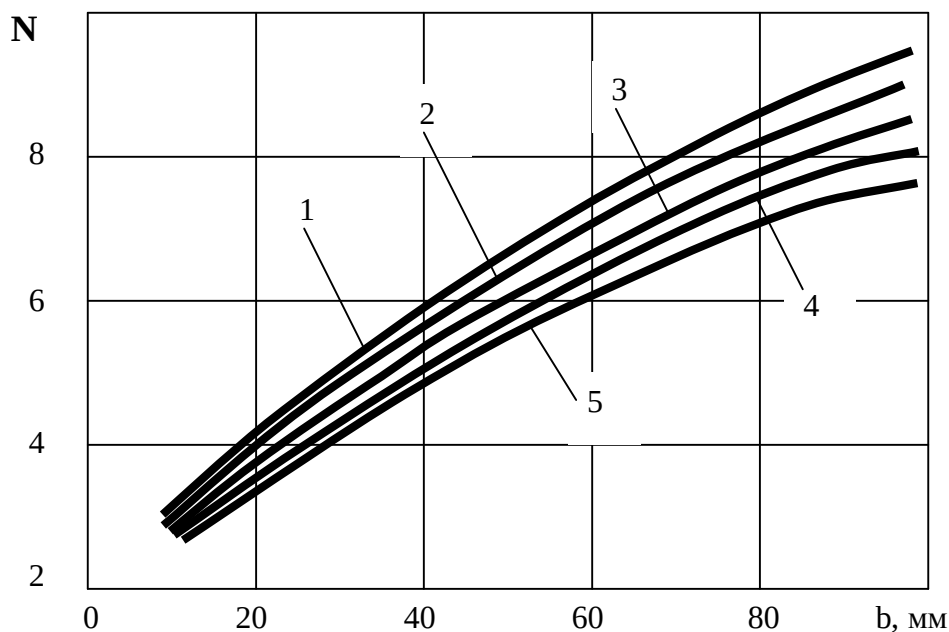


Рис. 3.44. Зависимость числа переходов при изготовлении швеллерного профиля от ширины полки и толщины заготовки: 1, 2, 3, 4, 5 – $s = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$ мм соответственно; $r = 0,6$ мм; $R = 5$ мм; $L = 400$ мм; $C = 100$ мм

Расчет числа переходов для 6 профилей с шириной полок более 60 мм показал, что ошибка в определении N не превышала величины 0,6 в сравнении с производственными результатами. Это означает, что построенная модель (с учетом округления числа переходов преимущественно в сторону увеличения) может применяться для прогнозирования за пределами диапазона параметров табл. 3.3, однако с известной долей осторожности. К сожалению, модель явным образом не содержит критерии ограничений, а потому при разработке технологии производства профилей с параметрами, выходящими за пределы диапазонов табл. 3.3, значение числа переходов подлежит уточнению с использованием, например, критерия локальной потери устойчивости элементов профиля (см. п. 3.8 данного раздела).

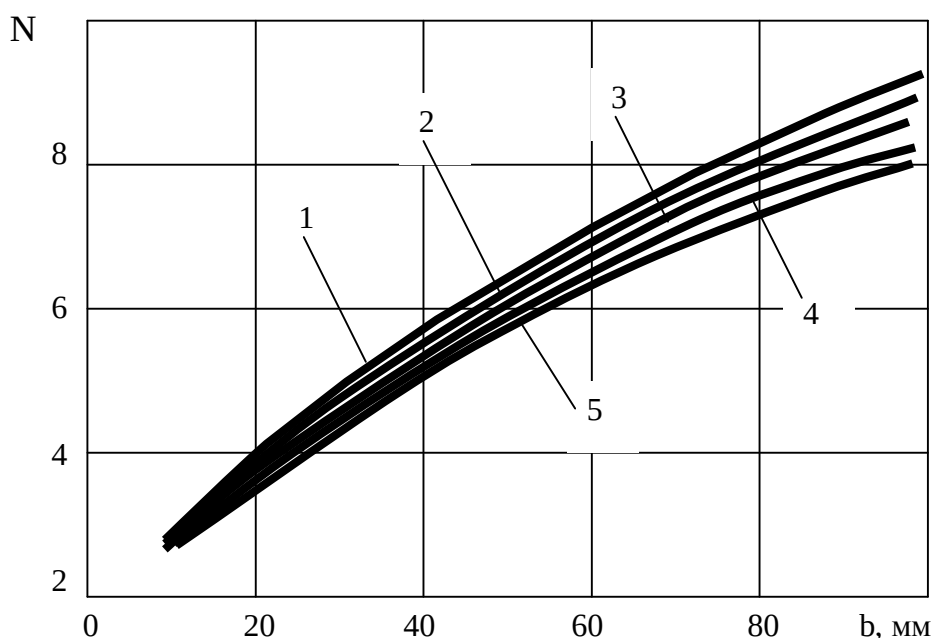


Рис. 3.45. Зависимость числа переходов (для швеллерного профиля) от ширины подгибаемой полки и ширины дна профиля: 1, 2, 3, 4, 5 – $C = 30; 60; 90; 145; 210$ мм соответственно; $r = 1,0$ мм; $R = 5$ мм; $L = 400$ мм; $s = 0,6$ мм

В том случае, когда применяются специфические схемы формообразования, например, для изготовления неравнополочных профилей, расчет числа переходов следует производить, беря во внимание более широкую из полок. При использовании способов предотвращения кромковой волнистости расчетное базовое число переходов может уточняться. Однако как показывает практика, корректировка осуществляется обычно в пределах одного перехода.

Отметим, что число переходов существенно влияет на приобретаемую продольную кривизну профиля как при СИ, так и при МИД. При использовании метода интенсивного деформирования продольная кривизна невелика и легко исправляется настройкой правильного устройства с роликовым правильным блоком. Когда же применяется стесненный изгиб, кривизна профиля на выходе оказывается столь значительной, что жесткий

конец профиля невозможно подать в роликовый правильный блок. В этом случае приходится применять правильный блок с врезными фильерами. Проблема становится особенно актуальной, когда производится поштучное формообразование профилей (например, в авиастроении). В этой связи рассмотрим условия формирования продольной кривизны профиля при использовании стесненного изгиба.

3.12. Осадка заготовки и продольная кривизна профиля

В окончательном переходе осуществляется наиболее ответственная часть процесса формообразования профиля методом СИ. При этом торцевое поджатие реализуется за счет осадки волнообразной заготовки в замкнутом калибре (рис. 2.12) независимо от конфигурации поперечного сечения профиля. В отсутствие поперечных и продольных (аксиальных) сил, действующих на профиль по его выходу из пары роликов окончательного формообразования, при осадке в калибре элементы профиля приобретают различные аксиальные деформации, которые приводят к продольному прогибу с радиусом изгиба 15 – 10 высот профиля и менее.

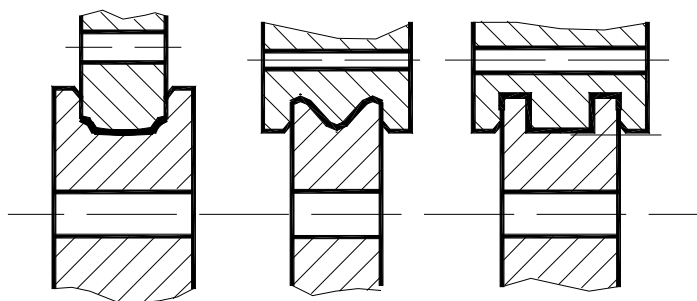


Рис. 3.46. Схема формообразования профиля

На примере корытного профиля рассмотрим переход заготовки от предварительной формы (рис. 3.47а) к окончательной (рис. 3.47б) по средней линии без учета скруглений на окончательном профиле [386].

При проектировании предварительного перехода формообразования профилей стесненным изгибом [368] обычно принимают радиус сопряжения стопки и боковой полки r_1 исходя из окончательной формы профиля:

$$r_1 = \frac{b_1}{2 \sin \alpha}, \quad (3.137)$$

где b_1 – ширина стенки; α – угол подгибки боковой полки.

Величина прямолинейного участка l_n на предварительном переходе определяется по формуле:

$$l_n = \frac{\left[\frac{a}{\sin \alpha} \left(\frac{b_1}{2} + b_3 \right) + a \operatorname{ctg} \alpha \cdot b_2 - \frac{B}{2} \right]}{a \operatorname{ctg} \alpha - 1}, \quad (3.138)$$

где b_3 – ширина горизонтальной полки; b_2 – ширина боковой полки; B – ширина заготовки профиля.

Значение радиуса кривизны ρ_2 дуги окружности, подвергающейся последующей осадке для формообразования горизонтальной полки с учетом формулы (3.138), определяется следующим образом:

$$r_2 = \frac{b_3 + (b_2 - l_n) \cos a}{\sin a}. \quad (3.139)$$

Формулы (3.138) и (3.139) справедливы, если выполняется условие:

$$\frac{B}{2} - b_1 \left(a - \frac{\sin a}{2} \right) - b_2 \cos a - b_3 < 0. \quad (3.140)$$

Если же условие (3.140) не выполняется, принимают $\rho_1 = \rho_2$, а формулу (3.138) заменяют более простой:

$$l_n = \frac{\frac{B}{2} - b_1 \left(a - \frac{\sin a}{a} \right) - b_2 \cos a - b_3}{1 - \cos a}.$$

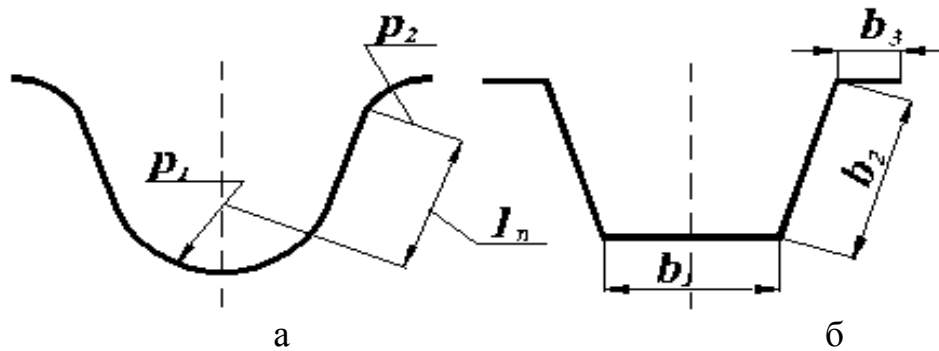


Рис. 3.47. Схемы переходов при СИ: а) – предварительный переход; б) – окончательный переход

В процессе осадки заготовки в целях формообразования стенки (рис. 3.48) часть заготовки перемещается таким образом, что формируется цилиндрическая поверхность, образующие которой параллельны оси ОХ и располагаются на расстоянии h от плоскости, касательной к заготовке и одновременно параллельной плоскости ХУ. Тогда расстояние определяется формулой:

$$h = r_1(1 - \cos a - 2a \cdot \sin a) - b \cdot \sin a, \quad (3.141)$$

где b – текущее значение образующей цилиндрической поверхности, изменяющееся от 0 до b_1 .

Для определения деформаций, возникающих на цилиндрической поверхности и имеющих направления, совпадающие с касательной линией к цилиндрической поверхности в каждой точке, перейдем от декартовой системы координат к цилиндрической:

$$x = X; \quad y = R \cos j; \quad z - R = R \sin j, \quad (3.142)$$

где R, φ, X – цилиндрические координаты.

Вычисление накопленной деформации ϵ_ϕ для произвольного $x = \text{const}$ будет производиться согласно [296] по формуле:

$$e_j = \int_j^0 x(j) dj, \quad (3.143)$$

где $\xi(\phi)$ – деформация бесконечно малого элемента в процессе перехода фиксированной точки поверхности ролика от угла $\phi + d\phi$ к ϕ .

Деформацию $\xi(\phi)$ определим по формуле:

$$x(j) = \ln \frac{ds}{ds_1}, \quad (3.144)$$

где ds – длина элемента при $R = \text{const}$; $x = \text{const}$ после деформации ds_1 – длина элемента дуги $R = \text{const}$; $x = \text{const}$ до деформации.

Как известно [296], длина элемента в криволинейной системе координат дается формулой:

$$ds_i = H_i dq_i, \quad (3.145)$$

где H_i – коэффициент Ляме; q_i – криволинейная координата.

По определению:

$$H_i = \left[\left(\frac{dx}{dq_i} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dq_i} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dq_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.146)$$

тогда длина элемента после деформации определяется путем весьма несложных вычислений из формул (3.142), (3.145), (3.146).

Начальную длину элемента находим из рассмотрения инфинитезимального приращения координаты ϕ :

$$ds_1 = R \cos j \, dj. \quad (3.147)$$

Учитывая, что для нашего случая значение криволинейной координаты R совпадает с величиной радиуса формирующего ролика, получим из соотношений (3.144), (3.147) и предыдущих рассуждений, значение:

$$x(j) = \ln \sec j. \quad (3.148)$$

Подставляя значение $\xi(\phi)$ формулы (3.148) в формулу (3.143) и производя интегрирование, получим:

$$e_j = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n-1} (2^{2n} - 1) B_n}{n (2n+1)!} j^{2n+1}, \quad (3.149)$$

где B_n – числа Бернулли.

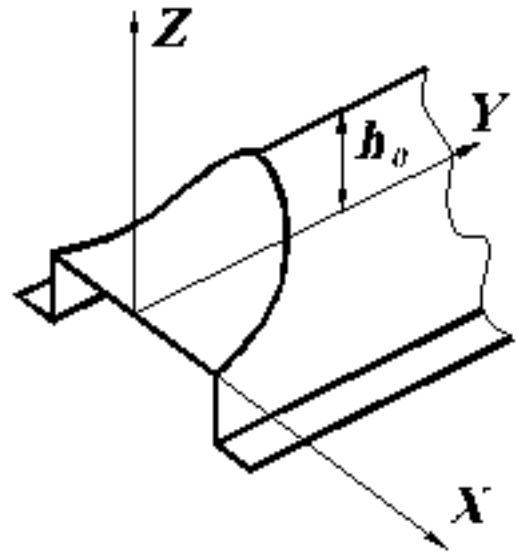


Рис. 3.48. Осадка заготовки в роликах

Из геометрического рассмотрения процесса осадки стенки (см. рис. 3.48) следует:

$$j = \arccos \left(1 - \frac{h}{R_1} \right). \quad (3.150)$$

Используя формулу (3.141) и полагая $b = 2x$, из соотношения (3.150) имеем:

$$j = \arccos \left[1 - \frac{r_1}{R_1} (1 - \cos a - 2a \sin a) + \frac{2 \sin a}{R_1} x \right], \quad (3.151)$$

где r_1 определяется из формулы (3.137).

Из выражений (3.149) и (3.151) получаем распределение деформации по стенке при выходе из калибрующей пары роликов:

$$e_j = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n-1} (2^{2n} - 1) B_n}{n (2n+1)!} \left\{ \arccos \left[1 - \frac{r_1}{R_1} (1 - \cos a - 2a \sin a) + \frac{2 \sin a}{R_1} x \right] \right\}^{2n+1}. \quad (3.152)$$

Как следует из формулы (3.152) величина деформаций зависит как от окончательной и предварительной форм профиля, так и от размеров формирующего инструмента. Надлежит также отметить инвариантность формулы (3.152) по отношению к параметрам, характеризующим механические свойства материала заготовка.

Отметим, что для обычной деформации формула (3.152) имела бы более простой вид:

$$e_j = \sqrt{\left(2 \frac{h}{R_1} - \left(\frac{h}{R_1} \right)^2 \right)} - \arcsin \sqrt{\left(2 \frac{h}{R_1} - \left(\frac{h}{R_1} \right)^2 \right)}, \quad (3.153)$$

где h определяется формулой (3.141) при $b = 2x$.

Формула (3.153) несколько менее громоздка по сравнению с формулой (3.152), однако более отражающими процесс деформирования являются логарифмические деформации, хотя при малых степенях деформаций обычные и логарифмические деформации практически совпадают.

Наличие аксиальных деформаций, определяемых формулами (3.152) или (3.153), свидетельствует о возможности образования продольного прогиба профиля при выходе его из пары роликов окончательного формообразования, если аксиальные деформации горизонтальных полок не создают условий для получения прямолинейного профиля.

Действительно, если существует некоторая разность (суммарная) аксиальных деформаций стенки ϵ_ϕ и деформаций полок ϵ_τ (средняя часть профиля не деформируется), то возникают эффективные продольные силы, создающие вращающий момент, ответственный за создание кривизны профиля $\frac{1}{R_0}$. Ввиду

симметрии неравномерность распределения деформации не приводит к скручиванию профиля, однако создает остаточные напряжения, которые снимаются последующей термообработкой.

Определим деформации, возникающие при формообразовании горизонтальных полок. Поверхность, образующуюся под воздействием роликов, можно описать уравнением линейчатой поверхности:

$$x = \frac{b_1}{2} = r \sin\left(a \frac{y}{l_0}\right); \quad y = y; \quad z + H + S_0 = r \cos\left(a \frac{y}{l_0}\right), \quad (3.154)$$

где r – расстояние от осигиба до произвольной точки поверхности; l_0 – длина деформированной зоны.

Используя соотношения (3.145) и определение натуральной деформации, можно найти распределение аксиальных деформаций горизонтальной полки:

$$e_r = \ln H_r, \quad (3.155)$$

где H_r – коэффициент Ляме.

Применяя определение (3.146), находим с использованием уравнения геликоидальной поверхности (3.154) величину коэффициента Ляме:

$$H_r = \left[1 + a^2 \left(\frac{r}{l_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.156)$$

Из выражений (29) и (30) после небольших преобразований получаем:

$$e_r = \frac{1}{2} \ln \left[1 + a^2 \left(\frac{r}{l_0} \right)^2 \right]. \quad (3.157)$$

Величину l_0 в формуле (3.157) можно определить из чистого геометрического процесса деформирования полки:

$$l_0 = \left[2R_2 r_2 (1 - \cos a) - r_2^2 (1 - \cos a) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.158)$$

где R_2 – радиус ролика, формирующего горизонтальную полку.

Из формул (3.157) и (3.158) следует, что деформация горизонтальных полок зависит не только от геометрии предварительного и окончательного переходов, но и от размера инструмента.

Сделаем теперь переход от деформации к действующим силам, создающим момент. Известно [300], что интенсивность деформаций e_{iy} для ортотропного тела определяется формулой:

$$e_{iy} = \sqrt{\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx} \cdot m_{xy}}} \times \sqrt{\left(\frac{e_j^2}{m_{yx}} - 2 \cdot e_j^2 + \frac{e_x^2}{m_{xy}} \right)}, \quad (3.159)$$

где m_{xy}, m_{yx} – коэффициент поперечной деформации, где первый индекс показывает направление поперечной деформации, а второй – направление действия силы.

С учетом условия несжимаемости материала для стенки, из формулы (3.159) получим:

$$e_{iy}^c = \sqrt{\left(\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx} \cdot m_{xy}} \times \left(\frac{1}{m_{yx}} + \frac{1}{m_{xy}} - 2 \right) \right)} e_j. \quad (3.160)$$

Для горизонтальных полок аналогично:

$$e_{iy}^n = \sqrt{\left(\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx} \cdot m_{xy}} \times \left(\frac{1}{m_{yx}} + \frac{1}{m_{xy}} - 2 \right) \right)} e_r. \quad (3.161)$$

Применяя известное соотношение для степенного закона упрочнения, действующее напряжение s_{iy} определяется как:

$$s_{iy} = s_i \cdot e_{iy}^n, \quad (3.162)$$

где s_i, n – константы материала в направлении оси прокатки.

Для вычисления момента необходимо определить положение центра тяжести профиля Z_c . Воспользовавшись известными формулами из теории двойного интеграла, получим:

$$Z_c = \frac{S_0 \left(\frac{H^2}{2 \sin a} + \frac{2H^2}{\operatorname{tga}} + b_3 H + S_0 H - \frac{S_0^2}{2} \right) + S_0^2 \left(\frac{b_1}{2} - \frac{3H}{2 \operatorname{tga}} - \frac{b_3}{2} - \frac{H}{\sin a} - H \right) + S_0^3 \left(\frac{2}{3 \operatorname{tga}} + \frac{1}{2} \right)}{S_0 \left(S_0 + b_1 + b_2 + \frac{1}{\sin a} \right) + S_0^2 \left(\frac{1}{\operatorname{tga}} - \frac{2}{\sin a} - 1 \right)}, \quad (3.163)$$

где S_0 – толщина исходной заготовки; $H = b_2 \sin a + S_0$.

Тогда момент M_0 действующих сил, создающих продольную кривизну, с учетом (3.160) – (3.163) определится как

$$M_0 = 2 \cdot S_0 \cdot K_0 \cdot \left[Z_c \cdot \int_0^{\frac{b_1}{2}} e_j^n dx - (H + Z_c) \int_0^{b_3} e_r^n dr \right], \quad (3.164)$$

где $K_0 = s_i \sqrt{\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx} \cdot m_{xy}} \left(\frac{1}{m_{yx}} + \frac{1}{m_{xy}} - 2 \right)}.$

Наличие аксиальных деформаций (3.160) и (3.161) свидетельствует о возможности образования продольного прогиба профиля при выходе его из пары роликов окончательного формообразования, если аксиальные деформации профиля не будут одинаковыми по всему сечению профиля или же сведены к нулю. Деформации (3.160) и (3.161) получены в предположении, что избыток ширины заготовки выбран таким, что он весь идет на утолщение зоны сгиба. Если же расчетная ширина заготовки завышена на некоторую величину, то аксиальные деформации стенки и полки определяются следующим образом:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_c + \frac{DB}{b_1} \frac{r_1}{r_1 + r_2}, \quad \varepsilon_r = \varepsilon_n + \frac{DB}{2b_3} \frac{r_2}{r_1 + r_2},$$

где ΔB – избыточная ширина заготовки.

Таким образом, в результате рассмотрения процесса формообразования выяснены факторы, определяющие кривизну получаемого профиля (см. фор-

мулу (3.164). Заметим, что величину кривизны $1/R_0$ профиля можно определить следующим образом:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{b_1 \int_0^{b_3} e_r dr - b_3 \int_0^{\frac{b_1}{2}} e_j dx}{2 \cdot b_1 \cdot b_3 \cdot H}. \quad (3.165)$$

Из формулы (3.165) видно, что кривизна получаемого профиля зависит как от геометрических характеристик его поперечного сечения, так и от технологических решений.

Проведем анализ полученных результатов. Установлено, что при изготовлении профилей в паре роликов окончательного формообразования возникает момент M_0 . Очевидно, что для исключения продольной кривизны требуется выполнение условия:

$$M_0 = 0. \quad (3.166)$$

Однако на практике такие условия реализовать не удастся: невозможно удовлетворить уравнению (3.166) выбором параметров в применяемом диапазоне их значений. Например, отказавшись от условий сопряжения (путем изменения ρ_1 и ρ_2) при проектировании предварительного перехода (рис. 3.47-а) мы создали бы неблагоприятные условия для формообразования боковой полки и получили бы на внешней ее поверхности задиры даже при высоком качестве поверхности формующего ролика. Увеличение размеров роликов также привело бы к необоснованным дополнительным затратам на изготовление оснастки. Кроме того, для получения профилей с одними и теми же габаритными размерами, но с различными геометрическими характеристиками зоны сгиба (внутренний радиус и утолщение) пришлось бы каждый раз изменять размеры роликов, ибо ширина развертки заготовки, определяющая величину утолщения зоны сгиба, входит в определение ρ_2 . Таким образом, более целесообразным было бы формулировать условие прямолинейности в виде:

$$M_0 - M_n = 0, \quad (3.167)$$

где M_n – момент создаваемый силами внешних устройств, в частности, правильным устройством.

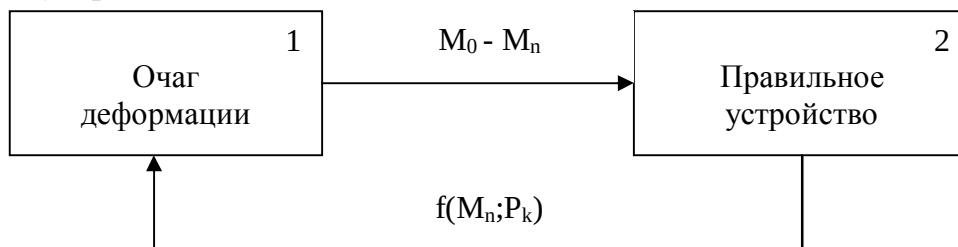


Рис. 3.49. Схема правки профиля по выходу из клетки окончательного формообразования

Схема работы такого правильного устройства представлена на рис. (3.49), которое по принципу действия может быть отнесено к одному из видов регулирующих устройств. В очаге деформации (блок 1) вырабатывается сигнал рассо-

гласования $M_0 - M_n$, который обрабатывает правильное устройство (блок 2) с соответствующими настроечными параметрами, воздействуя по принципу обратной механической связи через профиль на очаг деформации.

Требования к правильному устройству, его составные элементы описаны в разделе 5. Там же проведены расчеты компонентов правильного устройства. Правильное устройство (имеющее ряд модификаций) интегрировано в профилирующий станок и на протяжении 15 последних лет успешно работает в составе профилирующих станков и линий на многих десятках предприятий.

Выводы

Установленные функции, описывающие контуры угловой зоны при двустороннем высвобождении на основе эллиптической и гиперболической аппроксимации, используются при формулировке граничных условий задачи формообразования угловой зоны. Показано, что изменение кривизны заготовки может быть описано локоном Аньези.

Применение метода прямого интегрирования допускает замкнутое решение задачи гибки с торцевым сжатием ортотропной заготовки в терминах напряжений. Решение является асимптотически корректным; распределение напряжений оказывается независимым от анизотропных свойств материала.

Решение задачи СИ при значительном торцевом поджатии на основе сетки линий скольжения из логарифмических спиралей используется для формулировки условия пластической неустойчивости на внутреннем контуре зоны сгиба с целью определения предельных возможностей процесса.

Разработанная математическая модель зоны плавного перехода в отличие от известных моделей учитывает анизотропию заготовки, принцип формовки и влияние схемы приложения аксиальных сил. На основе модели сформулирован критерий ограничения углов подгибки, исходя из принципа минимума энергии деформирования. Модель также дает возможность производить расчет межклетьевого расстояния профилирующего станка.

Аналитическое представление схем формообразования позволяет формализовать процедуру проектирования роликов под стесненный изгиб.

Анализ способов предотвращения кромковой волнистости по разработанному классификатору показал, что наиболее эффективными средствами являются: оптимизация углов подгибки и числа переходов для базовой схемы формообразования, а также изменение формы линии профилирования (углов захода и выхода профиля) и применение межклетьевых проводок.

Разработанный критерий кромковой волнистости в виде индикаторной функции позволяет прогнозировать потерю устойчивости полки и имеет наглядную интерпретацию в виде решетчатой функции.

Разработанная модель прогибов донной части профиля позволяет уменьшать число переходов с увеличением ширины дна профиля по отношению к случаю формообразования профиля с абсолютно жестким дном.

На основе рекуррентных соотношений для сил и решения задачи пластического изгиба с растяжением получена модель подсчета методом итераций допустимого числа гофр, формируемых одновременно.

Разработанная впервые гибридная модель числа переходов для типовых профилей дает возможность априори задавать число переходов для типового профиля (углового, швеллерного, корытного и С-образного), подлежащего изготовлению.

Выявленные распределения продольных деформаций полок и стенки профиля при осадке позволяют установить величину продольной кривизны и соответствующего изгибающего момента, что использовано при формулировке требований к правильному устройству станка ГПС и его разработке.

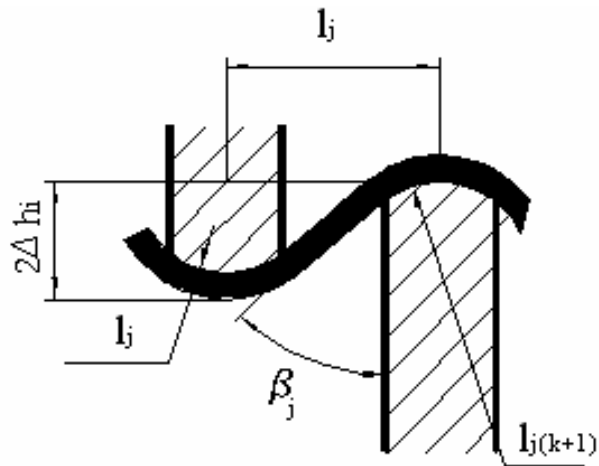


Рис. 3.39. Схема предварительного вдавливания роликов

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ

Теоретические зависимости предшествующего раздела, полученные при ряде допущений, подлежат экспериментальной проверке для обеспечения надежности технологии. Хотя общая программа экспериментальных исследований была составлена изначально, однако проведение экспериментов осуществлялось в жесткой привязке к проектированию и отладке технологии групп профилей или отдельных их представителей с целью минимизации затрат. Особенность состоит в том, что, как правило, технологическое оснащение пребывает доступным для проведения экспериментальных исследований лишь на стадии технологической отработки процессов, после чего передается в серийное производство заказчика. Даже после проведения активного эксперимента формирующие ролики перетачиваются под приемлемый типоразмер профиля. Для проведения исследований в режиме пассивного эксперимента данные по реализуемым типоразмерам профилей, материалам, числу переходов, схемам формообразования, режимам формовки и настройки оборудования, а также особенностям формообразования отражаются в журналах технологической отработки. Следует заметить, что ряд проблем для исследований возникает из недр рынка, из потребностей производителей профильной продукции.

4.1. Программа и средства экспериментальных исследований

4.1.1. Цель и задачи экспериментальных исследований

Целью исследований является верификация теоретических моделей и установление закономерностей формообразования заготовки в роликах, условий и параметров формообразования профиля, обеспечивающих его надлежащее качество.

Основные задачи исследований:

- верификация теоретических моделей, представленных в разд. 3;
- оптимизация схем формообразования;
- определение энергосиловых параметров;
- исследование специальных вопросов, актуальных для практики.

4.1.2. Основные факторы процесса и применяемые методы

Как установлено в разделах 1 – 3, основными факторами, влияющими на процесс пластического формоизменения заготовки при интенсивном формообразовании являются:

- характеристики оборудования (количество переходов и межклетьевое расстояние при скорости профилирования в пределах от 4 до 20 м/мин);
- геометрические характеристики сечения профиля (форма и размеры);
- технологические характеристики (параметры заготовки; схемы и режимы формообразования, включающие формы калибров, величину и точность установки зазоров в роликах, выбор и установку оси профилирования).

В качестве основных методов исследований применялись:

- метод конечных элементов;

- метод тензометрии;
- геометрические методы измерения линейных и угловых величин;
- косвенный метод оценки продольных деформаций;
- метод измерения твердости по Виккерсу;
- методы статистического анализа;
- металлографические методы исследования деформаций;
- методы рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии.

4.1.3. Программа исследования и применяемые средства

Программа исследований предусматривала основные этапы:

1. Экспериментальное исследование зоны уголковой зоны;
2. Исследование схем формовки уголковой зоны и схем формообразования;
3. Исследование поведения заготовки в межклетьевом пространстве и контактной зоне;
4. Изучение числа переходов;
5. Исследование энергосиловых параметров процесса формообразования профилей; исследования макро-, микро- и субструктуры элементов профиля;
6. Изучение специальных вопросов формообразования (влияние аксиальных сил, углов захода, перфорации, покрытия, элементов жесткости).

При реализации программы экспериментальных исследований применяли оборудование, инструменты и приборы, указанные в табл. 4.1 – 4.2.

Таблица 4.1

Оборудование, инструменты и приборы для экспериментальных исследований

№	Наименование	Назначение	Примечание
	1	2	3
1.	Ножницы дисковые ДИН-600, гильотинные ножницы	Подготовка заготовок	
2.	Кромкогибочное устройство; Гибочно-прокатные станки ГПС (табл.3.2)	Профилирование заготовок	Нест.
3.	Экспериментальная оснастка	Исследование схем формообразования	
4.	Пресс ПИГПЛУ-1	Физическое моделирование потери устойчивости полок	Нест.
5.	Устройство для измерения прогибов с индикатором часового типа (ИЧТ)	Измерение прогибов профиля	ГОСТ 577-68 (ИЧТ)
6.	Прибор МПБ-2	Измерение расстояний на элементах профиля, его толщины	
7.	Прибор ПМТ-3	Измерение твердости	
8.	Микроскоп МИМ-8	Изучение микроструктуры	
9.	Рефрактометр рентгеновский ДРОН-3	Исследование остаточных напряжений	

Продолжение табл. 4.1.

	1	2	3
10.	Электронный микроскоп	Исследование субструктуры	
11.	Усилитель тензометрический УТЧ-1	Преобразование сигналов с первичных датчиков	
12.	Осциллограф НЕВА-МТ1	Регистрация параметров	
13.	Ультразвуковая установка	Контроль качества профилей	Нест.
14.	Испытательная машина ФР 100/1, разрывная машина Р-5, установка «ИМАШ» /АЛА- ТОО 20-75	Механические испытания исходных листов и лент, а также образцов, вырезанных из элементов профилей	
15.	Устройство для оценки прочности покрытия	Качество покрытия профилей	Нест.
16.	Цифровой фотоаппарат QV-R4 фирмы CASIO, сканер «MUSTEK-4800»	Фотографии и изображения образцов	
17.	Компьютер Pentium (I – III)	Ведение базы данных изготавливаемых профилей, технологических особенностей изготовления; статистическая обработка результатов; выполнение расчетов	
18.	Штангенциркули ШЦ-I, ШЦ-III	Измерение линейных параметров заготовок, оснастки	ГОСТ 166-80
19.	Наборы щупов № 2, № 4	Замер зазоров в роликах	ГОСТ 882-75
20.	Наборы радиусных шаблонов № 1, № 3	Замер радиуса кривизны заготовки в межклетьевом пространстве и радиусов скругления роликов	ГОСТ 4126-82

Таблица 4.2

Основные параметры оборудования

№	Модель	Количество клеток, шт.	Межклетьевое расстояние, мм	Скорость профилирования м/мин
	ЭГПС-300	2	250	
1	ГПС-200; ГПС-200М1 ГПС-200М11	4	220	4÷20
2	ГПС 300	4	400	
3	ГПС-300 М6	6	400	
4	ГПС-300 М8	8	400	
5.	ГПС-500М8	8	600	

Другие средства измерений и вспомогательные средства указаны в соответствующих разделах книги. В частности, в разделе 3 указан инструментарий для исследования уголковой зоны.

4.1.4. Применяемые материалы

Выбор материалов для экспериментальных исследований был predetermined номенклатурой профилей, пользующихся спросом на отечественном рынке. Поэтому материалом заготовок являлись преимущественно алюминиевые сплавы, стали группы 08 толщиной от 0,5 до 1,5 мм с цинковым покрытием и без него, а также с лакокрасочными и полимерными, волокнистые и композиционные материалы.

В партиях поставляемых материалов производились выборочные испытания стандартных образцов на растяжение с помощью разрывной машины Р-5. Результаты испытаний обычно не выходили за пределы, установленные ГОСТ или ТУ. Материалы стальных лент хорошо изучены в диссертации Титова Ю. А. [387], где показано, что поставляемые отечественными металлургическими предприятиями материалы удовлетворяют сертификатам качества или НТД.

4.2. Исследование уголковой зоны методом конечных элементов

Экспериментальные исследования по установлению контуров границ зоны сгиба при стесненном изгибе приведены в разд. 3. Измерение напряжений в уголковой зоне ввиду малости ее размеров сталкивается со значительными трудностями. Например, применение тензометрирования оказывается невозможным из-за близости размеров тензодатчиков и зоны сгиба. К тому же выделение соответствующих компонент напряжений представляет известные трудности, а сам метод все же остается косвенным. В этой связи была предпринята исследование уголковой зоны методом конечных элементов.

4.2.1. Конечноэлементная модель Горлача-Ефимова ¹

При решении задачи формообразования уголка методом конечных элементов [352] использовали математическую модель, которая включала нелинейные геометрические соотношения, связывающие логарифмический тензор деформации Генке с градиентом вектора перемещения, нелинейные физические соотношения, базирующиеся на ассоциированном законе пластического течения и вариационное уравнение Лагранжа, полученное из базового вариационного уравнения Гамильтона – Остроградского:

$$\int_V T \bar{\nabla} du dv = \int_{\Omega} T_N du d\Omega,$$

где T – тензор напряжения Коши; T_N – вектор напряжения на поверхности тела Ω с единичной нормалью N ; du – вариация вектора перемещения; $\bar{\nabla}$ – векторный оператор Гамильтона; V – объем тела.

¹ Разработка программы и ее конечноэлементная реализации осуществлена д.т.н Горлачом Б.А. и к.т.н. Ефимовым Е.А. в 1990 году.

Решение нелинейного вариационного уравнения осуществлялось модифицированным методом Ньютона-Канторовича. В качестве конечного элемента использовали четырехугольный девятиузловой элемент.

При составлении программы использовано модульное и структурное программирование. Язык программирования PL-1. Программа была ориентирована на ЕС ЭВМ с операционной системой версии не ниже 6.1. В качестве исходных данных использовали характеристики материала заготовки (коэффициент Пуассона, модуль Юнга), диаграмма «напряжение–деформация» в аналитическом или табличном виде, форма рабочего инструмента, коэффициент трения между заготовкой и инструментом.

В выходных данных ЭВМ выводится на печать следующая информация: напряженно-деформированное состояние заготовки на любом шаге нагружения и после разгрузки в точках интегрирования Гаусса; перемещения и нагрузки узловых точек конечных элементов; область распространения зон, охваченных пластическими деформациями; геометрия заготовки на любой стадии деформирования и после снятия нагрузки; информация о выходе точек детали на поверхность инструмента.

Процесс осадки заготовки исследовали пошаговым методом, начиная со 147 шага, когда заготовка, имеющая практически предельную кривизну в уголковогой зоне, находилась в состоянии свободной гибки. Увеличение шага на единицу соответствовало величине осадки на 0,1 мм. На рис 4.1 представлена уголковогой зона, разбитая на четырехугольные девятиузловые (узлы условно не показаны) конечные элементы с соответствующей нумерацией. При осадке элементы деформируются, причем наибольшей деформации подвержены элементы, расположенные в зоне наибольшей кривизны (элементы 5 и 6). Они пребывают в пластическом состоянии и легче подвержены деформированию, чем периферийные элементы 3, 4 и 7, заключенные в роликовый зазор и которые подвержены не изгибу, а лишь сжатию. С увеличением осадки элементы 5 и 6 вытягиваются в направлении биссектрисы угла. С увеличением осадки кривизна наружного контура увеличивается.

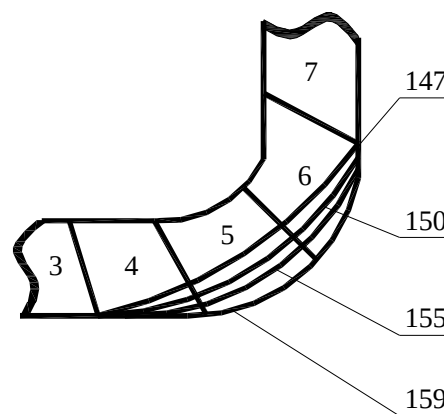


Рис. 4.1. Разбиение зоны на конечные элементы: 3–7 – конечные элементы; 147–159 – шаги нагружения

Зависимость тангенциального напряжения в вершинной точке наружного контура от шага нагружения показывает (рис 4.2), что с увеличением осадки оно снижается до некоторого значения с небольшой скоростью, после чего происходит его резкое уменьшение до нулевого значения. Затем оно растет по модулю, будучи уже сжимающим. Столь резкое изменение тангенциальных напряжений на наружном контуре в зависимости от величины осадки объясняется тем, что на первых этапах осадки происходит постепенное

заполнение роликового калибра (шаги от 147 до 158), а затем по мере его заполнения уголковая зона переходит в состояние сжатия (шаг 159). При этом нейтральный слой выходит на наружную поверхность. Дальнейшая осадка приводит лишь к аксиальной вытяжке материала. Отметим, что результаты решения задачи определения напряжений в зоне сгиба с помощью метода линий скольжения хорошо согласуются с данным расчетом методом конечных элементов в отношении напряжений вблизи наружного контура. Однако по внутреннему контуру тангенциальные напряжения, полученные с помощью метода конечных элементов примерно на 30 % меньше тех, что получены аналитически методом линий скольжения (см. разд. 3). Такое различие в результатах можно объяснить лишь недостатком в исходной постановке задачи для метода конечных элементов, а именно, заданием условия постоянного контакта инструмента и заготовки по внутреннему контуру зоны сгиба, которое уменьшает возникающие в процессе деформирования тангенциальные сжимающие напряжения. В действительности же процесс осадки сопровождается отделением заготовки в области внутреннего контура зоны сгиба от инструмента и последующим увеличением ее кривизны. Происходит как бы «отбрасывание» заготовки в сторону угловой части нижнего ролика. Следует также отметить, что деформации, вычисленные с помощью метода Смирнова–Аляева вблизи внутреннего контура зоны сгиба, также превышают значения деформаций, полученных методом конечных элементов, на величину порядка 20 %, в то время как для наружного контура расхождение не превышает 5 ... 10 %.

для метода конечных элементов, а именно, заданием условия постоянного контакта инструмента и заготовки по внутреннему контуру зоны сгиба, которое уменьшает возникающие в процессе деформирования тангенциальные сжимающие напряжения. В действительности же процесс осадки сопровождается отделением заготовки в области внутреннего контура зоны сгиба от инструмента и

последующим увеличением ее кривизны. Происходит как бы «отбрасывание» заготовки в сторону угловой части нижнего ролика. Следует также отметить, что деформации, вычисленные с помощью метода Смирнова–Аляева вблизи внутреннего контура зоны сгиба, также превышают значения деформаций, полученных методом конечных элементов, на величину порядка 20 %, в то время как для наружного контура расхождение не превышает 5 ... 10 %.

Распределение тангенциальных напряжений по наружному контуру по элементам приводится на рис. 4.3, откуда видно, что на первых шагах осадки элементы, удаленные от зоны сгиба (элементы 1 и 2) и находящиеся на стенке профиля, находятся в сжатом состоянии. Элемент 3, непосредственно прилегающий к зоне сгиба, испытывает наибольшее сжатие, а элементы с 4 по 7 (вернее, их области, выходящие на наружный контур) подвержены растяжению, которое весьма неравномерно распределено по углу. Столь прихотливая форма распределения тангенциальных напряжений свидетельствует о более сложном характере деформирования при стесненном изгибе, чем при обычной гибке, где тангенциальные напряжения во всех точках наружного контура одни и те же. Этот результат хорошо согласуется с формулой (3.30), полученной на основе

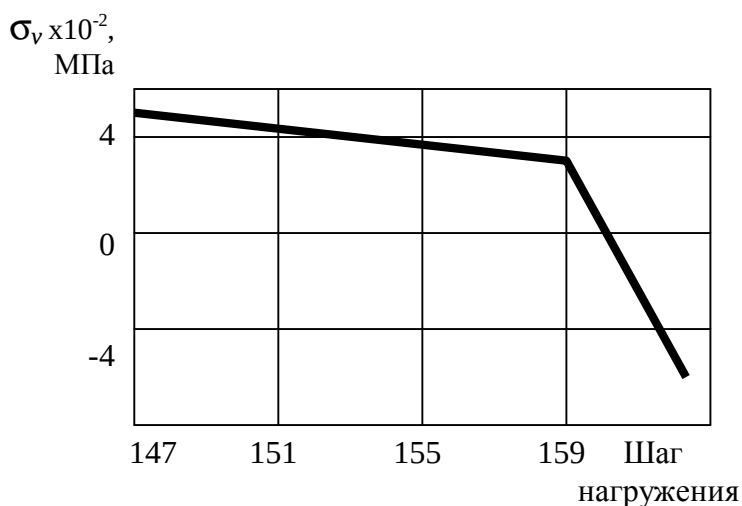


Рис. 4.2. Изменение тангенциального напряжения на наружном контуре по шагам нагружения

гипотезы ортогональности. Так, для утолщения 20 % ($\eta_f = 1,2$) значения напряжений отличаются не более, чем на 6–13 % (для различных точек наружного контура). При этом оценка (3.16) является справедливой, ибо линии разделения упругой и пластической зон располагаются на уровне четвертого и седьмого элементов. Характер кривых на рис. 4.3 также подтверждает этот факт.

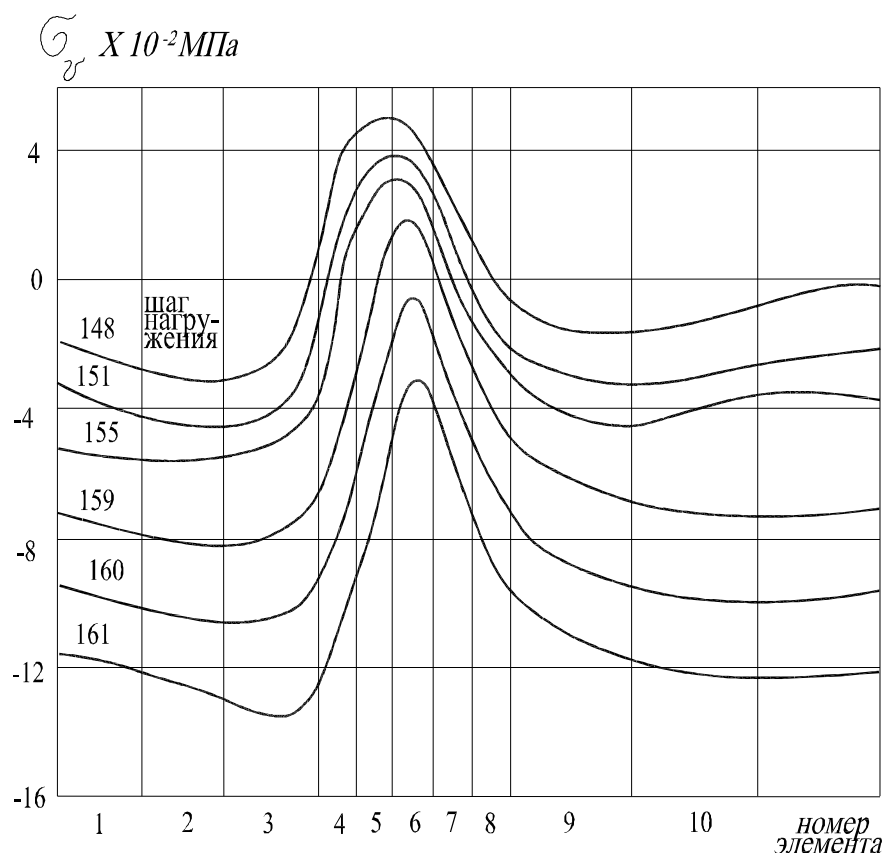


Рис. 4.3. Распределение тангенциальных напряжений на наружном контуре

Другим важным моментом является направление главных напряжений в каждой из точек зоны сгиба (рис. 4.4).

На наружном и на внутреннем контуре совпадение направления

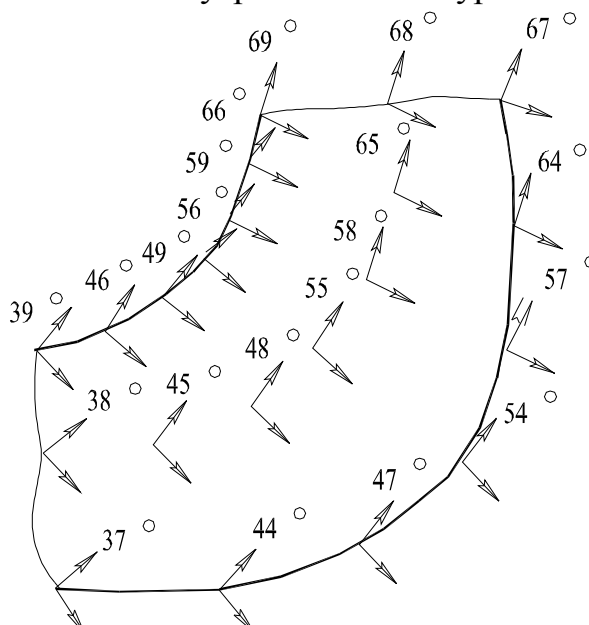


Рис. 4.4. Углы наклона главных напряжений по отношению к оси X

тангенциального напряжения с касательной к контуру имеет место лишь вблизи биссектрисы угла. По мере удаления точек от биссектрисы угла направление главных напряжений существенно отличается от направления касательной к

контуру и направления по радиусу (разумеется, для внутреннего и внешнего контуров центры их кривизны не совпадают, если имеет место утолщение материала в зоне сгиба). Для внутренних точек зоны сгиба подобная закономерность также имеет место.

Из данного рассмотрения следует, что при одностороннем торцевом поджатии, характерном для осадки предварительно сформованного профиля с плоским дном в роликах, направление главных напряжений в переходной зоне от криволинейной области заготовки к прямолинейной области характеризуется наличием сдвиговых деформаций в отличие от обычной гибки, для которой характерна зависимость напряжений лишь от величины радиуса-вектора, соединяющего центр кривизны и текущую точку.

В проведенных исследованиях использовали материалы алюминиевых сплавов (рис. 4.2 – 4.6 построены для сплава АМГ-6) и схему односторонней осадки заготовки. Практический интерес представляет также схема двусторонней подсадки заготовки из стали.

4.2.2. Моделирование уголковой зоны средствами ANSYS

При производстве мелкосортных профилей высотой до 50 мм и толщиной стенки 0,8...2,5 мм в некоторых случаях со стороны заказчиков технологии предъявляются особые требования к конфигурации угловых зон (например, радиус гiba менее допустимого и наличие утолщения). Профили с такими угловыми зонами изготавливаются только стесненным изгибом. Обычно набор материала в угловой зоне осуществляется за счет торцевого поджатия или осадки криволинейного участка заготовки избыточной ширины в закрытом роликовом калибре, радиусы угловых зон которого соответствуют требованиям чертежа к радиусам кривизны зон сгиба. Соответствующее технологическое оснащение не допускает вариаций характеристик угловой зоны, в то время как высвобождение угловой зоны, преимущественно со стороны внутреннего контура, могло бы расширить возможности технологии в части изменения размерных параметров угловых зон и, в особенности, применяемых материалов. Например, комплект технологического оснащения для производства профиля из алюминиевого сплава оказывается непригодным для изготовления профиля таких же габаритных размеров и толщины стенки из титанового сплава.

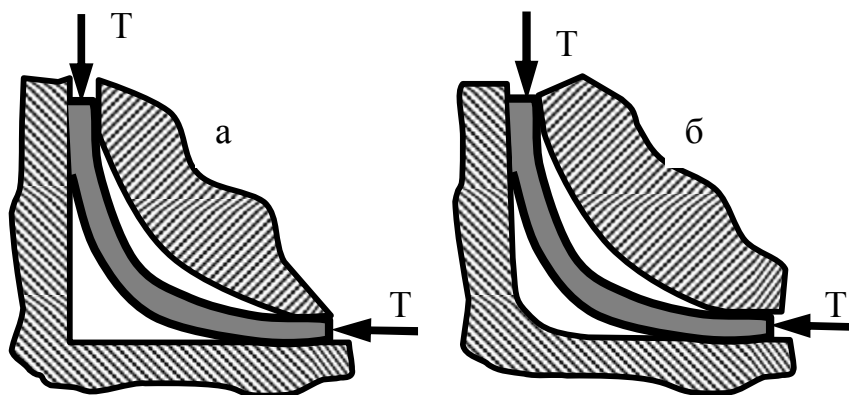


Рис. 4.5. Схемы формовки уголковой зоны: а) – с двусторонним высвобождением; б) – с высвобождением по внутреннему контуру и посадкой наружного контура

Высвобождение угловой зоны может быть односторонним или двусторонним (рис. 4.5), причем одностороннее высвобождение имеет место лишь при определенном условии, а именно: сила торцевого сжатия T должна быть достаточной для посадки наружного контура заготовки на инструмент.

Однако выявление условия посадки наружного контура заготовки и сопутствующих распределений напряжений и деформаций в угловой зоне далеко от тривиального. Это связано со сложной зависимостью вида и параметров НДС в заготовке от величины подсадки и ряда других условий [361]. Например, при посадке наружного контура неопределенными остаются граничные условия для наружного контура.

Можно предположить двоякое поведение заготовки на участках, примыкающих к зоне наиболее интенсивного деформирования: 1) тонкие заготовки будут подвергаться потере устойчивости в форме локального выпучивания с тенденцией к складкообразованию; 2) более толстые заготовки будут давать эффект одностороннего выпучивания с набором толщины на прямолинейных участках, примыкающих к зоне сгиба, что аналогично осадке призматического тела с ограничением по одной из боковых граней.

Известно, что потеря устойчивости заготовки при осадке может иметь место, если наименьший линейный размер сечения отличается от ее высоты более, чем в три раза [132]. С другой стороны, схема формовки профиля по переходам определяет целесообразное значение относительного радиуса кривизны заготовки к переходу, где производят осадку, не более пяти ее толщин [344]. Поэтому рассмотрим подсадку заготовки единичной толщины с изменением ее относительного радиусагиба (радиуса кривизны внутреннего контура) в осевой плоскости формирующих валков с пяти до значения, определяемого величиной подсадки (вертикального перемещения недеформированной части заготовки) (рис. 4.5-а) или условиями ограничения наружного контура зоны сгиба инструментом (рис. 4.5-б).

Для изучения вышеуказанных схем использовали пакет Ansys 7.1 (модуль LS-dyna), основанный на конечно-элементном анализе процессов формообразования и приобретенный по лицензии Ульяновским государственным техническим университетом.² В качестве препроцессора использовали программу Solid Works, а постпроцессорную обработку результатов производили встроенными средствами программы.

Поведение моделируемого участка профиля (рис. 4.5-б), разбитого на конечные элементы, представлено на рис. 4.6.

Перед посадкой наружного контура перемещения материальных точек в угловой зоне вблизи биссектрисы угла наиболее интенсивны и имеют линейные траектории, а на примыкающих участках они претерпевают изгиб (рис. 4.7). Такое поведение материала хорошо согласуется с результатами более ранних исследований [361], где установлено, что при торцевом сжатии характер распределения касательных напряжений имеет вид двугорбой кривой с провалом на биссектрисе угла.

² В исследовании принимал участие соискатель по кафедре «ОМД» УлГТУ В.В. Левщанов

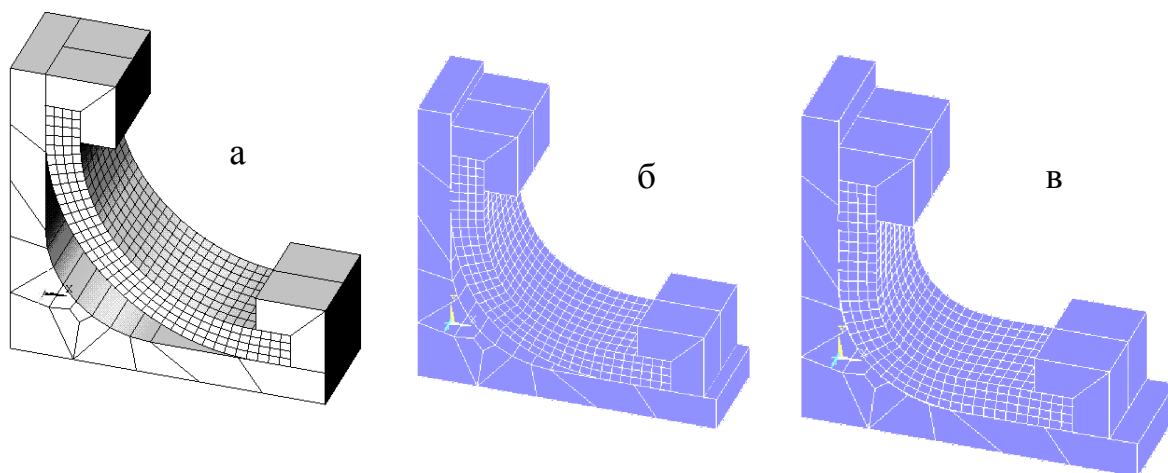


Рис. 4.6. Ход процесса деформирования: а) – исходное положение; б) – положение заготовки перед контактом; в) – посадка наружного контура заготовки

Из того же рис. 4.7 видно, что наличие деформаций сдвига существенно отделяет данную схему деформирования от схемы чистого изгиба, где справедлива гипотеза плоских сечений.

Анализ напряжений вдоль биссектрисы угла с точкой отсчета, лежащей на внутреннем контуре, показывает, что напряжения в окружном направлении на внутреннем и наружном контурах существенно отличаются по абсолютной величине (рис. 4.8). В классическом решении задачи чистого изгиба они должны были бы совпадать. Из того же рис. 4.8 следует, что нейтральный слой напряжений мигрирует в сторону наружного контура (см. точку схождения графиков на рис. 4.8) в отличие от чистого изгиба, где нейтральный слой напряжений (НСН) смещается к внутреннему контуру на величину:

$$DS = \frac{r + R}{2} - \sqrt{r \cdot R}, \quad (4.1)$$

где r , R – радиусы кривизны внутреннего и наружного контуров зоны сгиба соответственно.

В данном случае (43 шаг нагружения) величина смещения НСН составляет $0,1S_0$ (S_0 – толщина исходной заготовки). Значения напряжений в окружном направлении и положение НСН свидетельствуют о разгрузке наружного контура зоны сгиба, что позволяет производить гибку заготовки на меньшие радиусы, чем те, что традиционно приводятся в многочисленных справочниках по холодной штамповке. По рис. 4.8

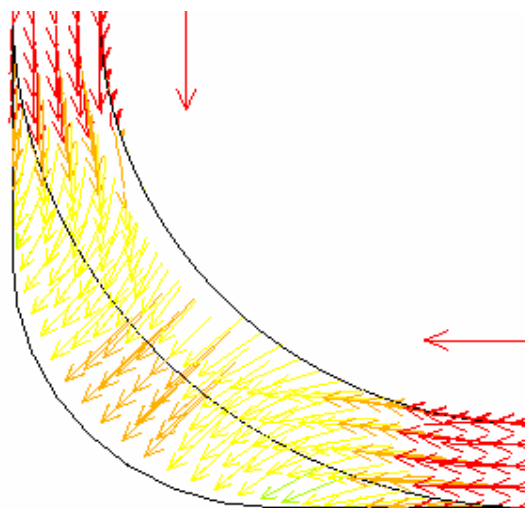


Рис. 4.7. Перемещения узлов деформируемой сетки модели

можно также установить вид напряженного состояния по значению фактора Лоде [132]:

$$n_s = \frac{2 \cdot s_2 - s_1 - s_3}{s_1 - s_3}, \quad (4.2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

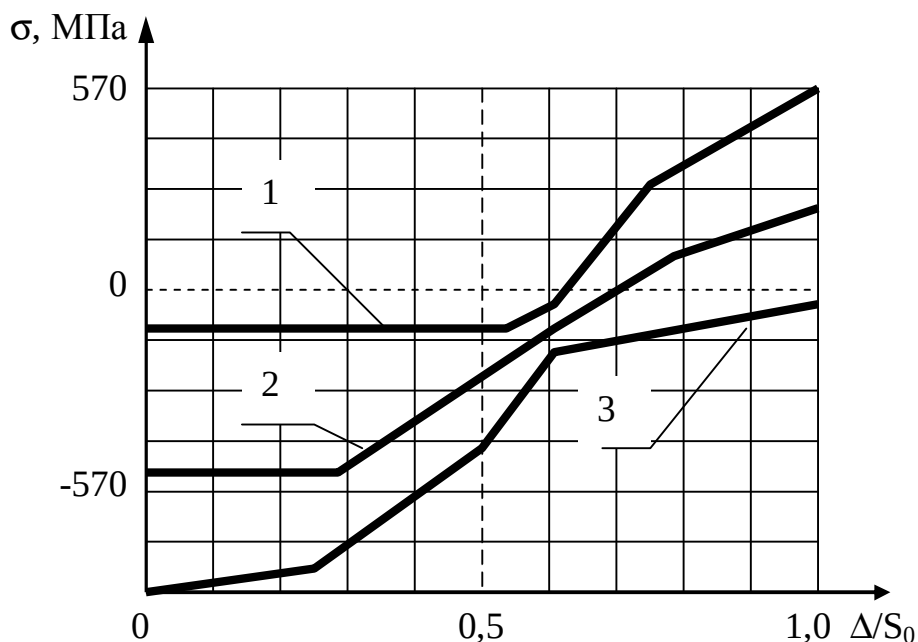


Рис. 4.8. Распределение главных напряжений по биссектрисе угла: 1 – радиальное; 2 – продольное; 3 – окружное

Подставляя соответствующие значения напряжений с рис. 4.8 в формулу (4.2), получаем, что практически во всех точках биссектрисы угла выполняется условие $V_\sigma \approx 0$, то есть имеет место случай плоской деформации. Для принятой модели этот вывод вполне закономерен. Деформационные характеристики угловой зоны также соответствуют реальному процессу и результатам работы

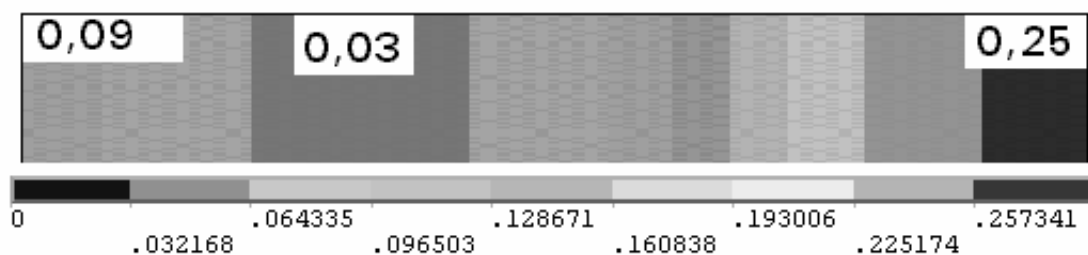


Рис. 4.9. Распределение окружных деформаций вдоль биссектрисы угла (вверху) от внутреннего контура к наружному (справа налево) и калибрующая шкала (внизу)

[350]. Уровень окружных деформаций на наружном контуре не превышает 10 %, а на внутреннем контуре составляет 25 % (рис. 4.9). Следовательно, наруж-

ный контур разгружается за счет действия торцевых сил, внутренний нагружается дополнительно (при чистом изгибе окружная деформация наружного контура составляет около 20 % при той же геометрии угловой зоны).

Анализ двух остальных деформаций (радиальной и продольной) показывает, что условие плоской деформации выполняется (продольная деформация в любой точке заготовки на биссектрисе угла не превышает 0,4 %). Условие несжимаемости также выполняется [132]:

$$\sum_{i=1}^3 \varepsilon_i = 0, \quad (4.3)$$

где ε_i – i – я главная деформация.

Аналогичные закономерности деформирования наблюдаются и на других этапах нагружения до момента контакта заготовки с дугообразным участком инструмента. При последующем нагружении после посадки наружного контура его окружные деформации находятся в стадии стагнации. Дальнейшее деформирование сопровождается набором толщины в зоне, примыкающей к биссектрисе угла, и на свободных участках полок. В реальном процессе деформирования набора толщины на полках не наблюдается по двум причинам: 1) в большинстве случаев внутренний радиус зоны сгиба задается инструментом по его номинальному значению с чертежа, так что зоны высвобождения отсутствуют и движение материала при существенном избытке ширины заготовки происходит в осевом направлении (условие плоской деформации не выполняется); 2) при наличии зон высвобождения ширину заготовки выбирают такой, чтобы утолщения полок или потери устойчивости не происходило.

Уменьшение продольной деформации возможно за счет переднего поджатия, что существенно усложняет технологию и на практике применяется редко, хотя и позволяет получить существенное утолщение в угловой зоне (до 20...30 %). Обычно заказчик заявляет желаемое утолщение в зоне сгиба до 5...10 %, что достижимо за счет выбора ширины заготовки в обеих схемах рис. 4.5, как это показали исследования процессов в среде Ansys 7.1 по схемам полного высвобождения наружного контура (рис. 4.5-а), а также со скруглением инструмента под наружный контур на радиусы двойной и тройной толщины заготовки.

Таким образом, высвобождение угловых зон за счет конструкции формирующего инструмента позволяет расширить возможности технологии в части изменения конфигураций угловых зон изготавливаемого профиля. Торцевое сжатие дает возможность разгрузить наружный контур зоны сгиба по деформациям в 2,0...2,5 раза, что обеспечивает получение радиусовгиба меньше допустимых при наличии утолщения, повышающего несущую способность профиля. Использование конечно-элементного анализа для исследования процессов формообразования позволяет совершенствовать технологию профилирования в роликах с экономией ресурсов и обеспечением высокой точности расчетов.

4.3. Технологически допустимые и предельные параметры угловой зоны

4.3.1. Ограничения в угловой зоне

Принципиальный путь определения предельных характеристик процесса деформирования в общем случае указан в работах [388, 306], однако специфика стесненного изгиба создает серьезные затруднения в использовании данного подхода. Для обычной гибки допустимый радиус кривизны посредством оценки интенсивности деформаций сдвига с учетом напряженного состояния был определен в работе [306]. Однако здесь не принималось во внимание изменение толщины листа, а верхняя оценка для интенсивности деформации сдвига принималась равной критическому значению последней при испытании образца на растяжение. В более поздних исследованиях [310] указывается, что разрушение в пластической области зависит в большой степени и от промежуточных напряженных состояний. Кроме того, при достижении критических значений деформаций при СИ происходит разрушение внутреннего контура в отличие от обычной гибки, где разрушается внешний контур.

Один из подходов к этой проблеме изложен в нашей работе [389], использующей результаты работ [353, 358, 350], изложенных в разделе 3. Исследуем плоское деформированное состояние в зоне сгиба, считая материал несжимаемым, ортотропным и упрочняемым по степенному закону. В работе [390] показано, что для технологических процессов, где пути деформирования являются сложными, необходимо учитывать эквивалентную накопленную деформацию по формуле $e_i = \int de_i$. Однако в нашем случае процесс можно считать квазимонотонным, поэтому в качестве накопленной деформации можно взять одну из главных деформаций в плоскости сечения.

Идея состоит в том, что при больших торцевых силах на внутренней поверхности заготовки начинается гофрирование материала, то есть теряется устойчивость деформирования. Данному состоянию должна соответствовать и определенная величина подкасательной на диаграмме Т–Г [297], соответствующая предельному состоянию:

$$DK = \left. \frac{TdG}{dT} \right|_K, \quad (4.4)$$

где ΔK – длина подкасательной; Т, Г – интенсивность касательных напряжений и интенсивность деформаций сдвига соответственно.

Расчет по формуле (4.4) с использованием результатов разд. 3, дает [389]:

$$\Delta K = \frac{2}{n\sqrt{3}} \ln \left[\frac{K^2(0, h_f, a) a_0 + (h_f / 2) \cdot K^2(h_f / 2, h_f, a) + \sqrt{h_f \cdot \sqrt{1 - K^2(h_f / 2, h_f, a)} \cos f}}{a_0 K^2(0, h_f, a)} \right]^{1 - \frac{f}{f_{\text{пр}}}},$$

где n – показатель упрочнения; a_0 – полуось оси аппроксимирующего эллипса в направлении биссектрисы угла, приведенная к толщине заготовки, ϕ – текущее

значение угла; $\phi_{\text{пр}}$ – условный предельный угол, под которым прямая разделяет пластическую и упругую зону (см. разд. 3).

Правая часть формулы (4.4) характеризует величину подкасательной на диаграмме Т-Г, которая при простом нагружении может быть удовлетворительно представлена результатами экспериментов по одноосному растяжению образца [297]. При этом считается справедливой «гипотеза единой кривой».

Последняя формула может быть упрощена. Гофрирование начинается в месте наибольшей кривизны вблизи биссектрисы угла, следовательно, можно положить $\phi = 0$. После небольших преобразований получим [389]:

$$C = \left[\exp\left(\frac{n \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot DK\right) / \left(\frac{h_f}{2} \cdot K_c^2 + h_f \cdot \sqrt{1 - K_c^2} \right) \right], \quad (4.5)$$

где C – кривизна внутреннего контура на биссектрисе, приведенная к толщине заготовки; K_c – коэффициент соотношения полуосей эллипса, отнесенный к срединной поверхности (определяется усреднением функции $K(\eta, \eta_b, \alpha)$ на внутреннем и наружном контурах).

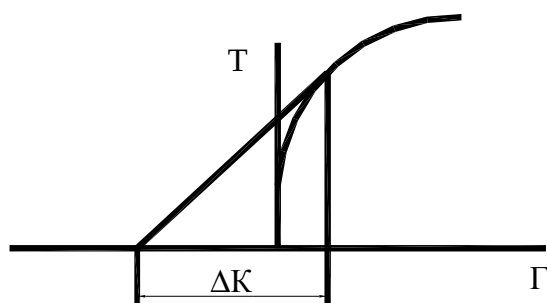


Рис. 4.10. Определение величины подкасательной по диаграмме Т-Г

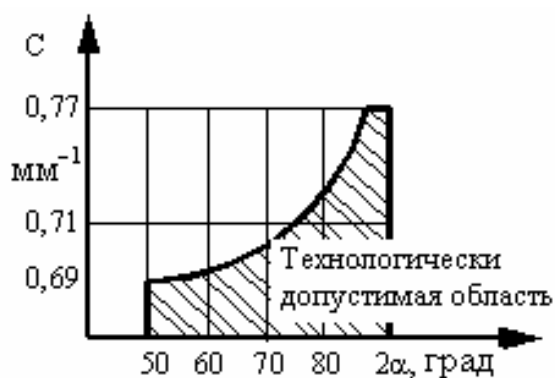


Рис. 4.11. Зависимость критической кривизны внутреннего контура от угла подгибки

Выражение (4.5) определяет условия, при которых происходит потеря устойчивости деформирования. Величина подкасательной легко может быть определена по кривой "Т - Г", поскольку в случае простого нагружения кривая упрочнения является выпуклой, следовательно, гарантируется однозначность. Методика нахождения ΔK является чрезвычайно простой. Зная, что гофрирование предшествует

разрушению материала на внутреннем контуре при исчерпании ресурса пластичности примерно на 4/5 (разность измерений микротвердости зоны сгиба на образцах с первыми признаками гофрирования и на разрушенных образцах при одноосном растяжении находилась в пределах от 16 до 23%) следует взять соответствующую точку и через нее провести касательную к кривой, а затем измерить величину подкасательной (рис. 4.10).

В качестве примера использования полученных результатов приведем зависимости предельной кривизны и предельного утолщения от угла подгибки для листового материала 01420. Как видно из рис.

4.11 и 4.12, с увеличением угла подгибки кривизна имеет тенденцию к росту, а утолщение – к спаду. Это объясняется тем, что с увеличением угла подгибки на внутреннем контуре создаются условия значительного сжатия приповерхностных волокон и при некоторых критических значениях сжимающих сил происходит гофрообразование, предшествующее разрушению, причем сжатие волокон становится больше с ростом утолщения и увеличением кривизны за счет увеличения угла подгибки..

Для двух схем с углами подгибки 72 и 90° при гибке прокаткой экспериментально исследовали уголки с различным утолщением, создаваемым за счет избыточной ширины трапецевидной заготовки толщиной 1,2 мм. Уголки, залитые в эпоксидную смолу, после изготовления шлифа исследовались на микроскопе МИМ-8. Измеряли утолщение η_f и радиус кривизны по методике разд. 3, а также определяли начало потери устойчивости деформирования по высоте гофра (высота 5 мкм – граница неустойчивости). Впрочем, при увеличении в 200 раз эту границу можно наблюдать визуально. Полученные результаты представлены в табл. 4.3.

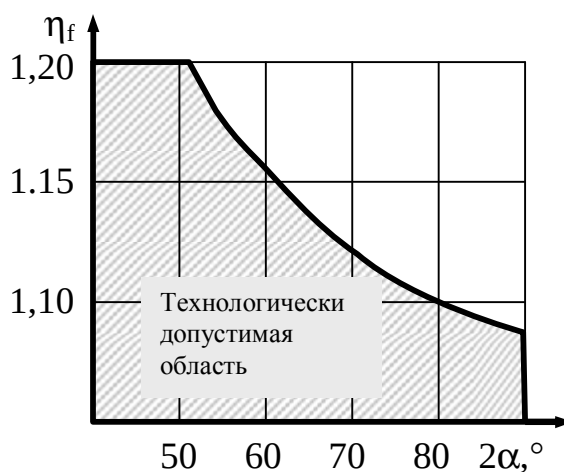


Рис. 4.12. Зависимость критического утолщения зоны сгиба от угла подгибки

Таблица 4.3

Критические параметры угловой зоны

Угол подгибки 2α , °	Утолщение η_f	Радиус гiba, $(r_B)/s_0$
72	1,12... 1,15	1,38... 1,42
90	1,08 ... 1,13	1,28 ... 1,35

Эти данные в значительной степени совпадают с данными рис. 4.11 и 4.12. Вычисленные значения среднеквадратического отклонения не превышают 0,02, что свидетельствует о достаточной надежности экспериментальных данных [391].

При разработке технологических процессов гибки профилей из авиационных материалов следует принимать во внимание технологически допустимую область (рис. 4.11, 4.12), в которой можно получать изделия без дефектов внутреннего контура.

Отметим, что данный подход к решению задач предельного деформирования в условиях одноосного нагружения был использован Консидере (по данным работы [363]). Здесь этот подход применен к случаю более сложного вида напряженно-деформированного состояния.

Более широкие экспериментальные исследования предельных параметров в угловой зоне при формообразовании профилей в роликах представлены в ра-

ботах [392 – 396], часть которых включена в отраслевую НТД (см. разд. 6). Применительно к кромкогибочным устройствам предельные параметры угловой зоны основательно изучены А.В. Скрипачевым [89, 397]. В частности, для титанового сплава ОТ-4 – $\eta_f \leq 1,11$, $r_B/s_0 > 1$; для композита АБМ-1 – $\eta_f \leq 1,03$, $r_B/s_0 > 4$ [397]. Однако характер ограничений при формообразовании дисперсных, волокнистых и слоистых композиционных материалов стесненным изгибом имеет свои особенности.

4.3.2. Ограничения при формовке композитов

Двухфазные композиты с бериллиевой b - фазой [398] обладают малой плотностью ($r = 2,35 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), относительно высокими прочностными свойствами (в нагартованном состоянии $s_B = 600 \text{ МПа}$), значительной выносливостью и повышенной коррозионной стойкостью (не склонны к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением), что и обеспечивает их широкое использование в авиастроении.

Однако изготовление изделий из двухфазных композитов представляет собой хотя и разрешимую, но довольно сложную технологическую задачу в связи с ограничениями на предельно допустимый радиус гибки [399, 122]. Например, для материала АБМ-1 $\bar{r}_{\min} = 10 - 12$ при гибке в холодную, и $\bar{r}_{\min} = 3 - 4$ при гибке с нагревом до $280 - 350^\circ \text{C}$. При этом разрушение может начинаться как на наружном, так и на внутреннем контуре.

В работе [400] разработан подход к учету влияния дисперсных частиц при формообразовании стесненным изгибом, основанный на статистическом подходе [401, 402]. При решении задачи предел текучести материала задавали в виде:

$$T(h, x) = s_s^a + s_s^a \left(\frac{s_s^b}{s_s^a} - 1 \right)^g \cdot f(h, x), \quad (4.6)$$

где s_s^a – предел текучести материала матрицы; s_s^b – предел текучести материала наполнителя; g – экспериментальная константа для данного композита; $f(h, x)$ – мультипликативная функция, учитывающая объемное содержание b -фазы и локализацию частиц наполнителя.

Мультипликативная функция $f(h, x)$ определена следующим образом:

$$f(h, x) = q^{1/3} \cdot I(h - h_i) \cdot I(x - x_i), \quad (4.7)$$

где q – объемное содержание дисперсной фазы в композите, I – индикаторная функция, учитывающая случайный характер распределения b -фазы, и равная нулю при расположении точки в a -фазе, и равная единице – при расположении точки в i -ой частице b - фазы.

В предельном случае, когда $q \rightarrow 0$, формула (4.6) переходит в константу для однородного тела, состоящего только из a -фазы; при $q \rightarrow 1$, ввиду отсут-

вия усреднения в формуле (4.7), также получаем условие пластичности для однородного материала, но уже с пределом текучести b – фазы. Промежуточный случай дает вполне реальное состояние материала за счет введения экспериментальной величины g .

Ограничиваясь качественным анализом ограничений ввиду громоздкости формул, определяющих НДС, отметим три ограничения на деформируемость материала в зоне сгиба: во-первых, это – повреждение поверхности внутреннего контура, связанное с трансляционным и ротационным характером движения частиц, с их выходом на поверхность внутреннего контура в процессе деформирования; во-вторых, в слое вблизи внутреннего контура с увеличением тангенциальных сжимающих напряжений происходит значительный рост напряжений в зерне, что при достижении последними критических значений приводит к его разрушению; в-третьих, при небольших силах тангенциального поджатия происходит разрушение наружного контура вследствие исчерпания ресурса пластичности материала.

Механизм первого ограничения может быть представлен следующим образом. С увеличением тангенциального сжатия случайным образом распределённые частицы, расположенные в зоне сжатия вблизи биссектрисы угла, совершают на первоначальных этапах поступательное движение, поскольку градиент тангенциального напряжения по толщине заготовки невелик. Затем, при последующем увеличении тангенциального сжатия и градиента напряжений соответственно, происходит и поворот частиц. Однако такой механизм в большей части характерен для композитов с относительно малым объемным содержанием дисперсных частиц. Для композитов с высоким содержанием дисперсных частиц $q > 0,3$ возможен несколько иной механизм повреждения внутреннего контура, а именно, с увеличением тангенциального сжатия, частицы находящиеся в сжатой зоне вблизи внутренней поверхности зоны сгиба, могут образовывать кластеры, из которых выход частиц на поверхность возможен как за счет поворота отдельных частиц под воздействием других, так и путем "прорезания" (выдавливание частицы соседними частицами). Последнее характерно для деформирования в горячем состоянии. Данный вид разрушения характерен и для волокнистых композитов типа ВКА (рис. 4.13-а) [396].

Частицы дисперсной фазы еще до деформации находятся в сжатом состоянии, происхождение которого – остаточные термонапряжения, появляющиеся вследствие различия коэффициентов термического расширения матрицы и частиц при

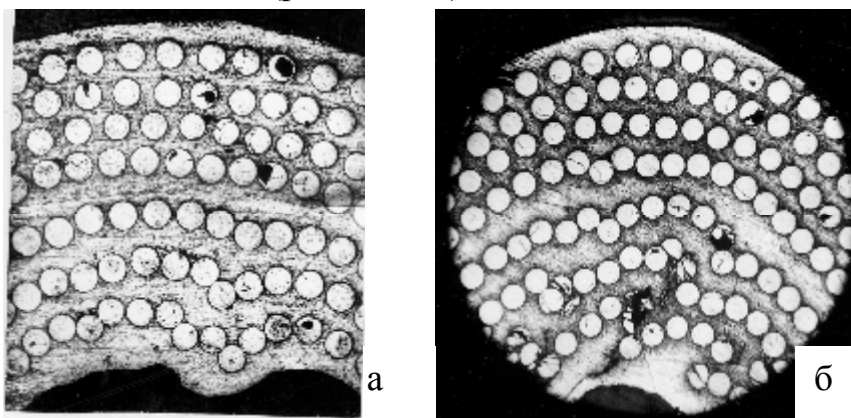


Рис. 4.13. Предельные состояния в ВКМ: а) – выдавливание волокон; б) – разрушение волокон

охлаждении листа на стадии его изготовления. Остаточные термонапряжения имеют порядок предела текучести и не зависят от размеров частиц. Наложение дополнительных сжимающих напряжений s_x может приводить к разрушению зерен (рис. 4.13-б) с вероятностью:

$$l = \left(\frac{k_p s_x d^{1/2}}{q^{1/3}} \right) - k_0, \quad (4.8)$$

где l – вероятность разрушения частиц; d – средний диаметр частицы; k_p, k_0 – постоянные данного материала, определяемые согласно работе [402].

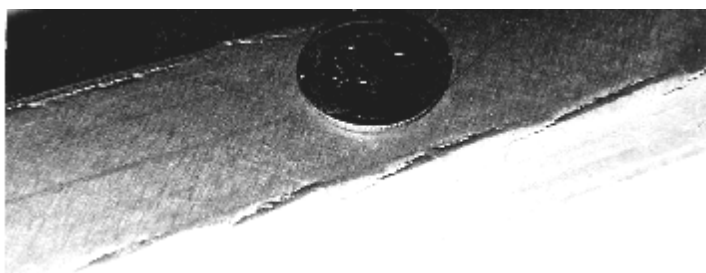


Рис. 4.14. Разрушение наружного контура композиционного материала ВКА-2

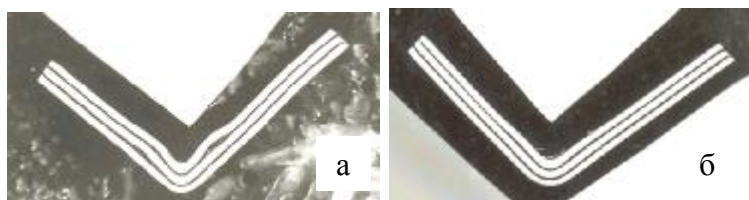


Рис. 4.15. Угловой профиль из композита АЛОП-41:

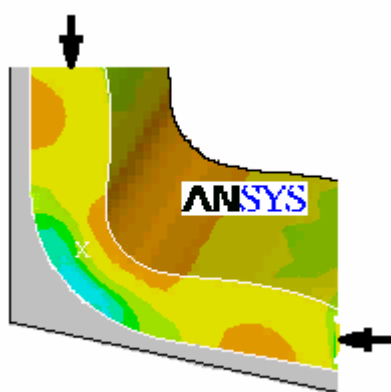


Рис. 4.16. Модель формообразования уголка из АЛОП-41

Разрушение композита по наружному контуру представлено на рис. 4.14.

Формообразование слоистых композитов методом СИ сталкивается с проблемой расслоения материала (рис. 4.15-а). Профили, представленные на рис. 15, изготовлены в кромкогибочном устройстве со смещенной осью³ [17, 403, 404]. Для выявления причин расслоения материала вблизи уголковой зоны процесс был смоделирован в среде ANSYS (рис. 4.16), откуда видно подобие формы заготовки изображению уголка на рис. 4.15-а. Разумеется, характеристики НДС доступны для визуализации на каждом этапе эволюции модели.

Качественный угловой профиль получен с использованием прижимных планок особой формы на кромкогибе специальной конструкции, что явилось предметом авторских свидетельств на изобретение [403, 404]. Кромкогибочные устройства весьма удобны для проведения исследований формирования угловой зоны профиля, однако для практики не имеют большого значения.

Гибка слоистых композитов в роликах весьма затруднена ввиду полного расслоения заготовки (рис. 4.17) в межклетьевом пространстве. Хотя для некоторых материалов (например, «СИАЛ») воз-

³ Экспериментальные работы по материалу АЛОП-41 выполнены А.Г. Проскуряковым

можно режимы, позволяющие получить профили простых конфигураций в ро-
ликах методом СИ. В этом случае имеют место расслоения на торцах заготовки
из-за приложения торцевых сил (рис. 4.18-а). При малых радиусахгиба как и у



Рис. 4.17. Расслоение заготовок композита при гибке в роликах

мономатериалов происходит разрушение наружного контура зоны сгиба (рис.
4.18-б). В 2002 году разработана технология производства длинномерных угол-
ковых профилей из материала «СИАЛ»; изготовлены и переданы в ВИАМ для
испытаний опытные партии профилей с радиусами порядка 2 – 4 толщин ис-
ходной заготовки (рис. 4.19).

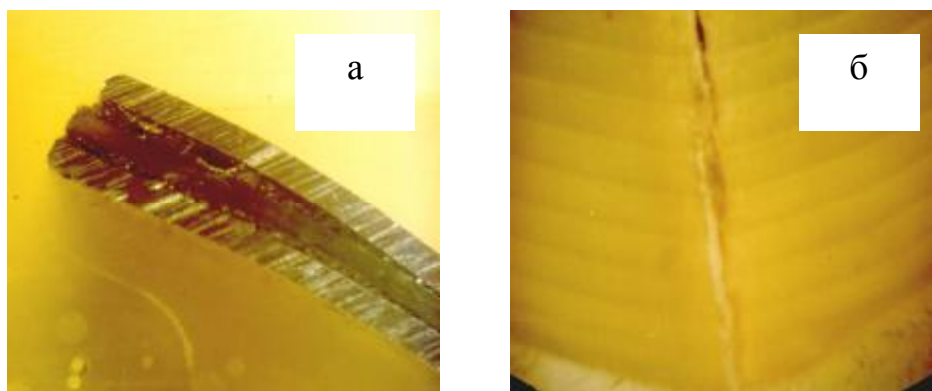


Рис. 4.18. Дефекты композита СИАЛ: а) – торцовое расслоение;
б) – разрушение наружного слоя

К сожалению, до настоящего времени не удалось внедрить в авиастрое-
ние профили из композиционных материалов, изготовленные методом СИ. Это
связано как с технологической сложностью данной проблемы, так и с незначи-
тельным финансированием работ (с 1994. по 2002 год инвестиции в разработку
технологии производства профилей по
данному направлению отсутствовали).
Получение кондиционного профиля из
слоистого композита требует увеличения
числа клеток в 2 – 3 раза по сравнению с
производством профилей из традицион-
ных сплавов.



Рис. 4.19. Зона сгиба профиля из ком-
позиционного материала «СИАЛ»

4.4. Металлографические исследования профилей и заготовок

Интенсификация процесса формообразования профиля в роликах оказывает существенное влияние на микроструктуру материала. Если характеристики зерна стальных сплавов могут влиять только на коррозионные свойства конечного продукта, то характеристики зерна профилей из алюминиевых сплавов, применяющихся в качестве стрингеров летательных аппаратов и работающих в циклическом режиме нагружения, оказывают влияние и на ресурс. Из этих же соображений в авиации назначают радиусыгиба (см. разд. 7).

Исследовали авиационные профили из сплава Д16ЧА зетобразного сечения 16x18x20x4x1,0 мм с радиусомгиба 2 мм и относительной толщиной зоны сгиба $\eta_f = 1,06$, а также профили корытообразной конфигурации 40x9x15x1,2 мм с радиусомгиба 1,8 мм из сплава 01450, с относительной толщиной зоны сгиба $\eta_f = 1,27$, полученные с посадкой наружного контура по схемам стесненного изгиба (см. п. 3.4)⁴.

Образцы поперечных сечений профилей, полученных из заготовок в свежезакаленном состоянии без последующей термической обработки, исследовали после травления в реактиве Келлера. Применяли модифицированный микроструктурный метод Г.А. Смирнова-Аляева [364], позволяющий определять деформации на образцах с исходной неравноосной структурой. На фотографиях микроструктуры (рис. 4.20) исходного листа проводили измерения длины отрезков l_{0j} и r_{0j} , пересекающих по 10 зерен в параллельном поверхности и перпендикулярном ей направлениях соответственно. Аналогичные измерения (l_j , r_j) проводили в выбранных точках фотографий микрошлифов поперечных сечений образцов, причем в угловых зонах серии измерений ассоциировали с тангенциальным (окружным) и радиальным направлением главных деформаций. В привязке к выбранной точке замеры проводили по пяти близким параллелям, а результаты измерений подвергали статистической обработке. Положение точек зоны сгиба, вблизи которых производили измерения, представлены на рис. 4.21. Эти точки определяются пересечением внутреннего 1 и наружного 3 контуров зоны сгиба с биссектрисой 4 угла, перпендикулярном к полке 2 и промежуточными сечениями 5. Тангенциальную и радиальную компоненты деформации рассчитывали по формулам:

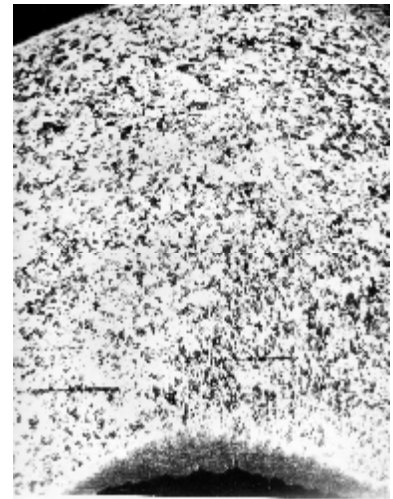


Рис. 4.20. Микрошлиф зоны сгиба профиля

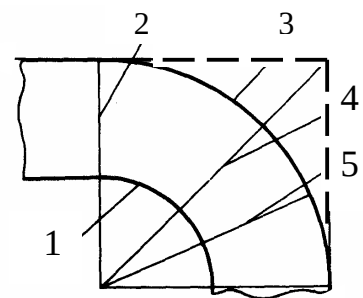


Рис. 4.21. Топология точек определения деформаций

⁴ В исследования принимали участие инженеры-металловеды Т.В. Янкевич и Т.В. Перязева

$$e_{qi} = \ln \frac{l_i}{l_0}; \quad e_{ri} = \ln \frac{r_i}{r_0}, \quad (4.8)$$

где l_0, r_0 – длина усредненных отрезков на исходной структуре; l_i, r_i – длина усредненных отрезков на образце после деформации в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно, отнесенных к i -й точке.

Погрешность в определении e_θ, e_r согласно формулам (4.8) не превышала $\pm 2\%$ при доверительной вероятности 0,95. Эпюры деформаций (рис. 4.22 и 4.23) показывают, что с увеличением поджатия происходит возрастание сжимающих тангенциальных деформаций на наружном контуре зоны сгиба (у профилей с $\eta_f = 1,06$ и $r/s_0 = 2,0$ тангенциальная деформация наружного контура изменяется в пределах от -9 до $+18\%$, а у профилей с $\eta_f = 1,27$ и $r/s_0 = 1,5$ – от -17 до $+8\%$). Хотя в переходных зонах эта деформация зависит от радиусагиба и утолщения. При незначительных утолщениях на наружном контуре доминируют деформации растяжения, а при больших утолщениях волокна наружного контура пребывают в сжатом состоянии.

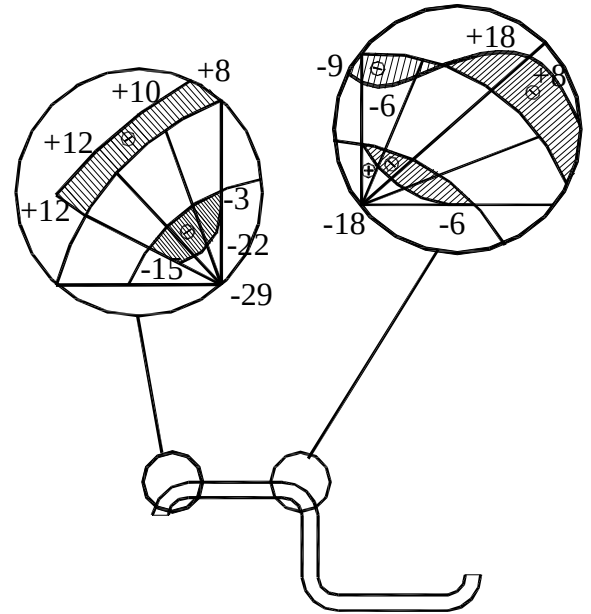


Рис. 4.22. Эпюры деформаций угловых зон зетобразного профиля

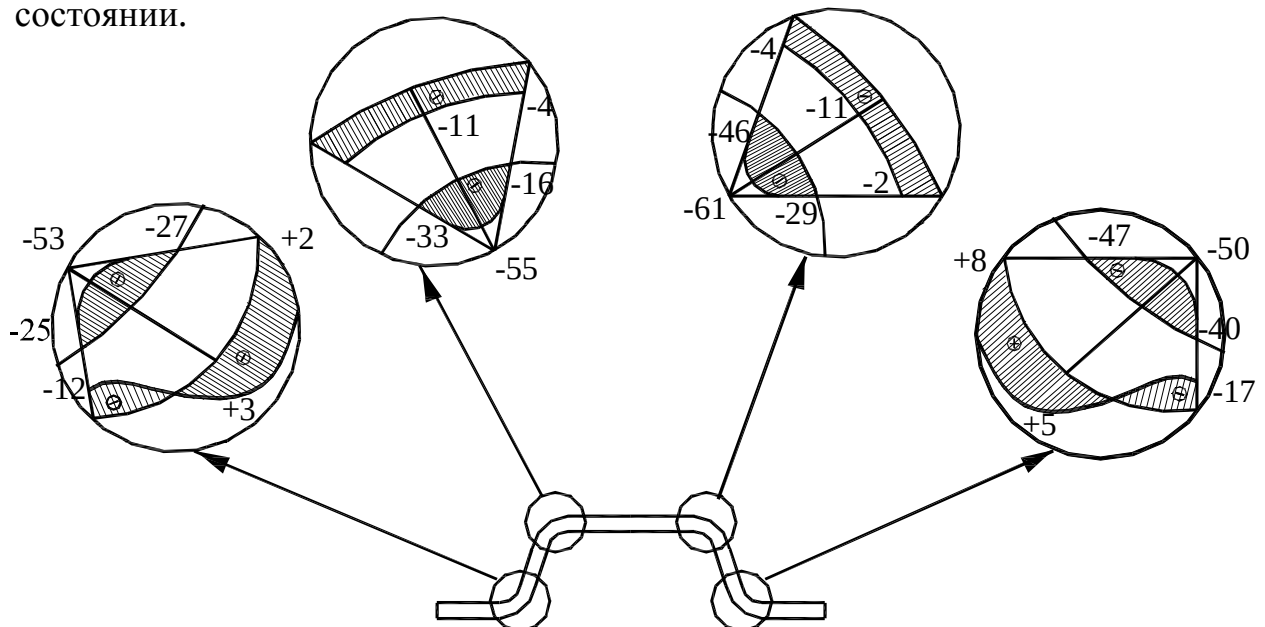


Рис. 4.23. Эпюры деформаций угловых зон профиля

Можно наблюдать различие в распределении деформаций в периферийных и в центральных зонах сгиба. Например, наружный контур периферийной зоны сгиба на рис. 4.22 характеризуется знакопостоянной тангенциальной де-

формацией (8...12 %), в то время как в центральной зоне сгиба деформация знакопеременная (–9...+18 %). Аналогичные закономерности имеют место и для рис. 4.23. Указанные различия в распределении деформаций объясняются спецификой схемы формообразования, характерной для стесненного изгиба.

Волокна внутреннего контура зон сгиба во всех случаях испытывают знакопостоянное сжатие (см. рис. 4.22 и 4.23). Дополнительные сжимающие силы влияют на качество поверхности внутреннего контура угловых зон профиля: рост деформаций сжатия приводит к появлению неровностей, гофр и зажимов (рис. 4.24).

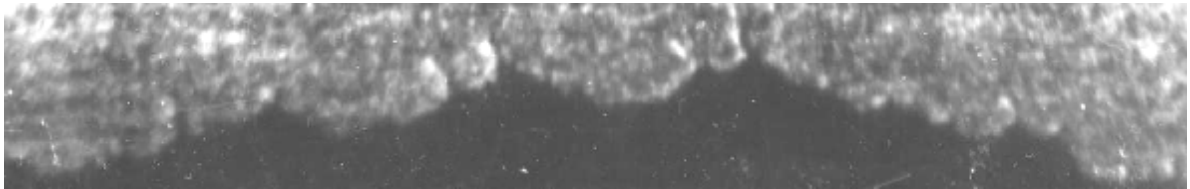


Рис. 4.24. Микронеровности и зажимы на внутреннем контуре

В случае посадки внутреннего контура (ограничения инструментом) происходит проглаживание зажима на внутренней поверхности зоны сгиба роликом и превращение его в закат (рис. 4.25).

Изучение микроструктуры профилей из материала 01450, подвергнутых после формообразования термообработке (закалке с последующим старением) при температурах, превышающих температуру рекристаллизации показало, что крупнокристаллический ободок присутствует во всех точках зоны сгиба. Отметим, что у профилей, полученных обычной гибкой, такой ободок наблюдается лишь по внешней и внутренней поверхностям зон сгиба. Различие степеней деформации по элементам профиля, вызывает не только изменение структуры, но и их механических свойств (см. разд. 6, п. 6.18).

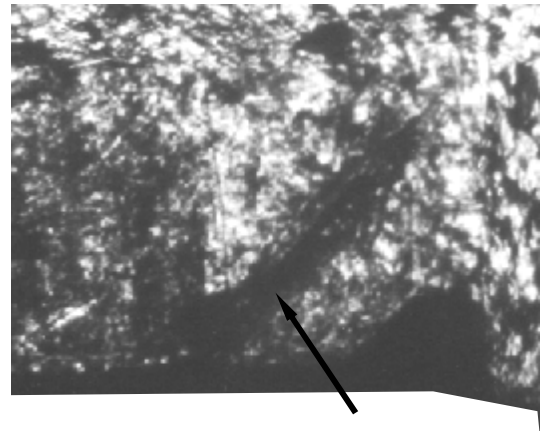


Рис. 4.25. Закат зажима на внутреннем контуре

С целью определения предпочтительных технологических маршрутов, партии Z-образных профилей 16x18x20x4x1,0 мм и 16x18x20x4x1,2 мм из сплава В95пчАТ2, изготовленных по установленным схемам рис. 3.18 (формулы 3.66 – 3.68), были подвергнуты исследованиям в ВИАМ [405]. Исходный материал – холоднокатаные плакированные листы с рекристаллизованной структурой, характеризующиеся средними размерами зерна 15×40 мкм (толщина листа 1,0 мм) и 20×150 мкм (толщина листа 1,2 мм).

«Проведено исследование влияния зеренной структуры, состояния сплава перед формообразованием с малыми радиусами и перезакалки на структуру профиля в состоянии Т2 (закалка + старение при 115°C (5 ч.) и при 165°C (15 ч.)). Профили изготавливали по двум вариантам: **1** – закалка+гибка (в свежезакаленном состоянии)+старение; **2** – отжиг+гибка+закалка +старение.

После предварительной прокатки с $\epsilon = 20\%$ свежезакаленных листов (**вариант 1**) толщина зерна несколько уменьшается. У большинства зерен наблюдается линии скольжения. После перезакалки (с выдержкой 10 мин) линии скольжения сохраняются, размеры зерна практически не изменяются. При $\epsilon = 20\%$ микротвердость, прочностные свойства и относительное удлинение зерен с интенсивными линиями скольжения понижается на 10 %, при $\epsilon = 10 - 15\%$ механические свойства практически не изменяются.



Рис. 4.26. Линии скольжения вблизи зоны сгиба на профиле из сплава В95

Характер деформации отожженных листов (**вариант 2**) с гетерогенной структурой заметно отличается от характера деформации закаленного гомогенного материала: деформация становится однородной, линии скольжения не наблюдали. Прокатка с $\epsilon = 5 - 15\%$ не влияет на размер зерна закаленного гомогенного сплава. При $\epsilon = 20\%$ зерно укрупняется в 3 раза (средний размер зерна увеличивается от 15 до 35 мкм). После перезакалки толщина зерна возрастает до 50 мкм. Таким образом, с точки зрения изменения величины зерна изготовление профилей по второму варианту менее предпочтительно.

Исследование профилей в состоянии Т2, полученных из листов первой партии по первому варианту, показало, что их зеренная структура во всех четырех зонах сгиба в целом мало отличается от структуры основного металла. Размер областей с линиями скольжения (рис. 4.26) достигает $1,4 \times 0,3$ мм, причем в периферийных углах деформация более интенсивна, чем в срединных углах.

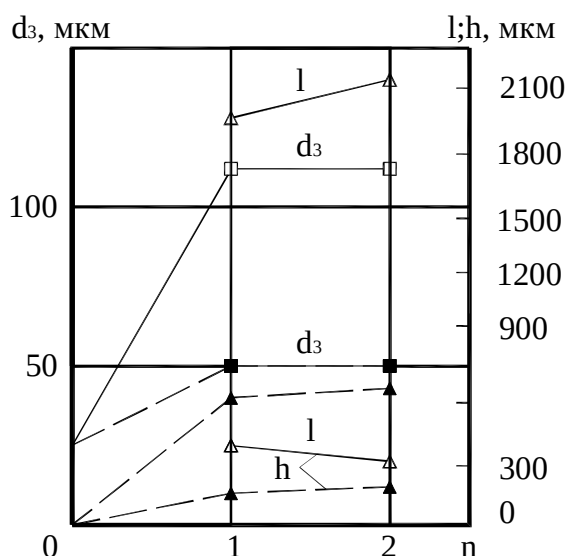


Рис. 4.27. Влияние перезакалки на размеры зерна (d_3), длину (l) и толщину (h) крупнозернистых зон в профилях из первой партии (n - число перезакалок): сплошные линии – профиль из отожженного листа; штриховые линии – профиль из свежезакаленного листа [405]

В углах профиля, полученного по второму варианту (из отожженного листа первой партии), наблюдается значительный рост зерна (от 15 до 150 мкм). После перезакалки с выдержкой 10 мин.) размер зерна, толщина и протяженность областей с крупным зерном мало изменяются (рис. 4.27).

У профилей, полученных из закаленного сплава наблюдается меньшая склонность к росту зерна, чем из отожженного. Поведение листа второй партии со сравнительно крупным зерном при формообразовании профиля имеет свои особенности. В углах профиля при гибке свежезакаленного листа наблюдаются участки с отчетливыми линиями скольжения, как и в профилях из листов первой партии. Перезакалка не вызывает собирательной рекристаллизации (в отличие от листов с относительно мелким зерном), линии скольжения сохраняются. При гибке отожженного листа (вариант 2) линии скольжения не наблюдаются. Таким образом, в зонах сгиба профилей из отожженного относительно мелкозернистого листа зерно укрупняется лишь до 100 — 150 мкм; рост зерна существенно замедляется при использовании более крупнозернистых исходных листов» [405].

Более детальную картину механизмов деформирования, структуры и распределения остаточных напряжений дают тонкие методы исследования.

4.5. Исследование характеристик профиля тонкими методами

С целью исследования влияния технологии стесненного изгиба на выходные характеристики профиля на уровне субструктуры, применяли методы электронной микроскопии (электронный микроскоп УМВ-100К с увеличением в 20500 крат) и дифрактометр ДРОН.⁵

Исследовали характеристики профиля корытного типа с отбортовками, изготовленного из свежезакаленного материала 01420Т толщиной 1,2 мм по схеме (рис. 4. 28), описанной в п. 3.4 работы.

На сечении конечного профиля с внутренним относительным радиусом 1,0 зоны сгиба и ее утолщением 7 % представлены пронумерованные точки для проведения исследований (рис. 4.29).

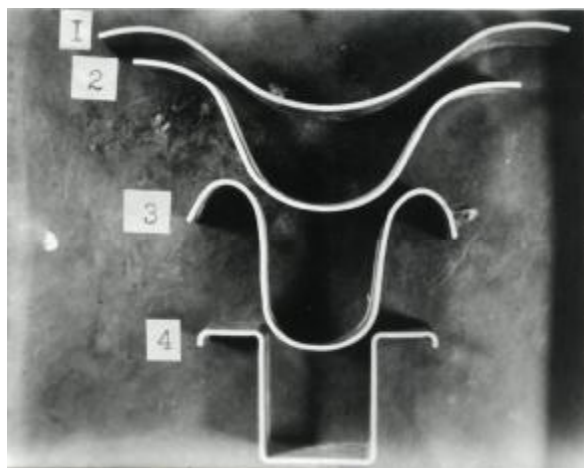


Рис. 4.28. Схема формообразования профиля для проведения исследований

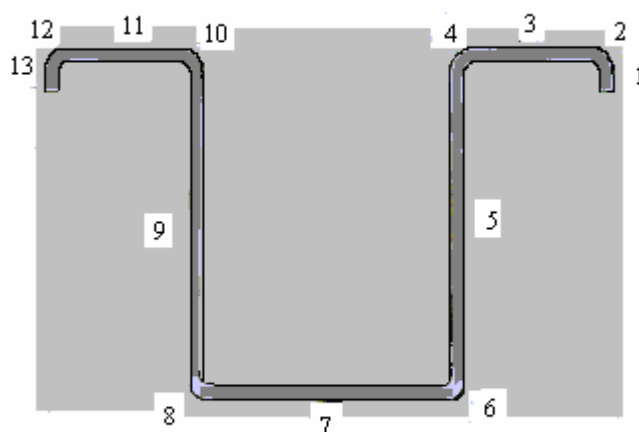


Рис. 4.29. Сечение профиля с выбранными точками для исследований

⁵ Исследования образцов выполнены инженерами Н.А. Красильниковым и Е.Н. Чебурахиным

Вырезанные из соответствующих мест профиля образцы механическим шлифованием доводили до толщины порядка 0,2 мм, после чего выбивали диски диаметром 3 мм. Электрополирование дисков производили в тefлоновых шайбах-держателях под струями электролита до появления отверстия. Затем полученные тонкие фольги подвергали исследованию на электронном микроскопе. На рис. 4.30-а приведена субструктура исходного листа, а на рис. 4.30-б и рис. 4.31 – субструктуры вертикальной полки 5, стенки (дна) 7 и горизонтальной полки 11 согласно рис. 4.29. Исходный лист имеет полигональную структуру, внутри которой после закалки появляются одиночные дислокации, являющиеся впоследствии центрами выделения сфероидов упрочняющей фазы при старении. Из рис. 4.30 и 4.31 видно, что деформация увеличивает плотность дислокаций.

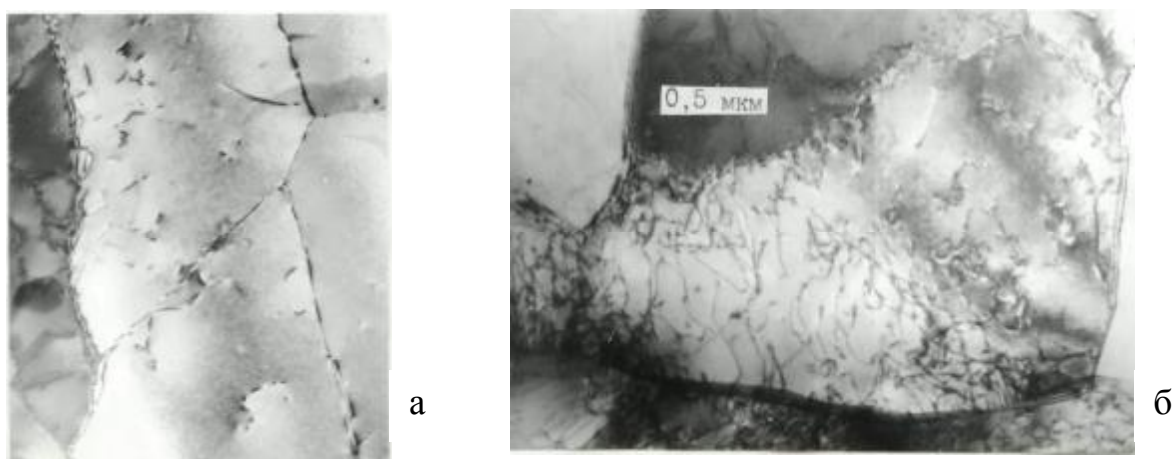


Рис. 4.30. Субструктура исходного листа (а) и вертикальной полки 5 (б)

Для перехода к количественным показателям зависимости плотности дислокаций и степени деформации производили одноосное растяжение образцов из исходного листа с различными степенями деформации вплоть до разрушения. Затем на рентгеновском дифрактометре снимали дифрактограммы и измеряли параметры субструктуры. Установленная зависимость представлена на рис. 4.32, где пунктирной линией также отображена известная зависимость для материала Д16. Точками отмечены экспериментальные результаты.

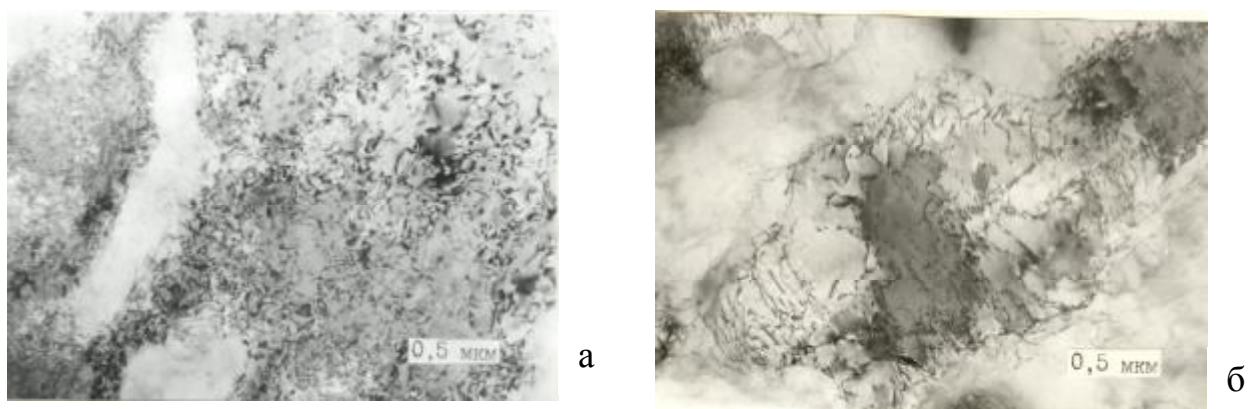


Рис. 4.31. Субструктура стенки (а) и горизонтальной полки профиля (б)

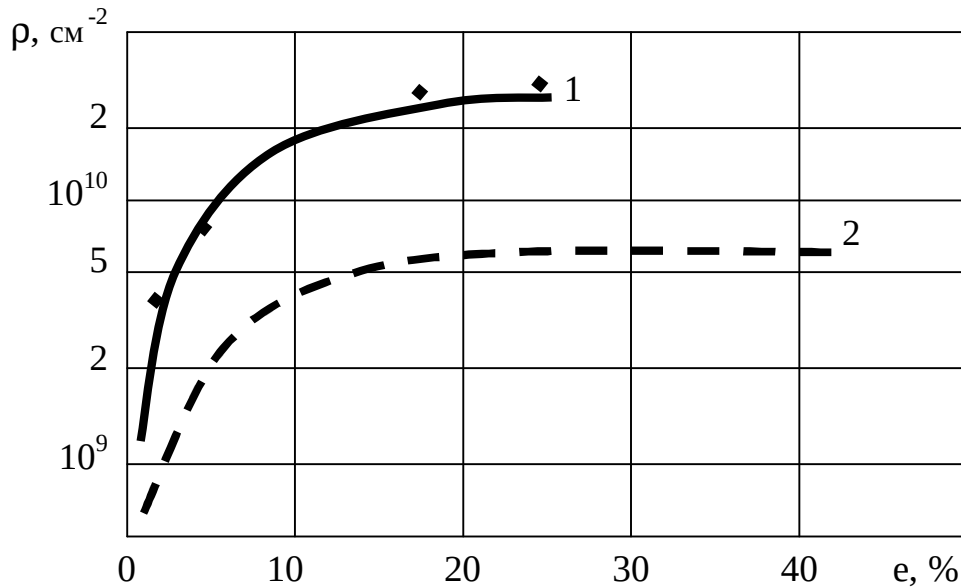


Рис. 4.32. Зависимость плотности дислокаций от степени деформации: 1 – 01420; 2 – Д16

Для установления взаимосвязи плотности дислокаций с микротвердостью (рис. 4.33) параллельно с рентгеновскими исследованиями проводили измерения H на приборе ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамидку $0,5H$.

Рис. 4.33 указывает практически на линейный характер зависимости плотности дислокаций и микротвердости. Подобную зависимость можно было бы считать оптимистичной для служебных свойств профиля, однако последующая термообработка и старение профиля практически аннулируют достигаемый эффект деформационного упрочнения. Однако такая ситуация характерна лишь для профилей, применяемых в качестве стрингеров, требующих после формообразования дополнительных формоизменяющих операций гибки по контуру, подсечки, а иногда и малковки. При производстве профилей из сталей, особенно толщиной более 2 мм, эффект деформационного упрочнения становится ощутимым [81, 406]. Характеристики плотности дислокации, микротвердости и толщины элементов исследуемого профиля приведены в табл. 4.4.

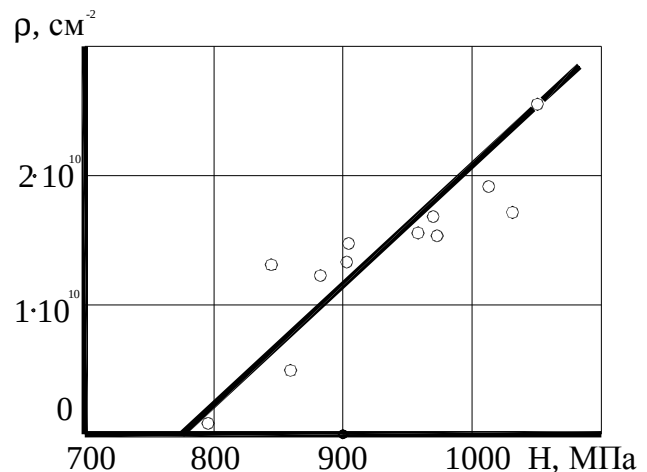


Рис. 4.33. Связь плотности дислокаций и микротвердости для сплава 01420

Эффект упрочнения в уголовой зоне можно проследить по рис. 4.34, где показано распределение плотности дислокаций по биссектрисе угла. Вид на фотографии того же рисунка дает возможность визуально оценить различие деформаций наружного и внутреннего контура зоны сгиба по изменению тол-

щины плакирующего слоя. Отсюда также видно смещение нейтрального слоя к наружному контуру.

Таблица 4.4

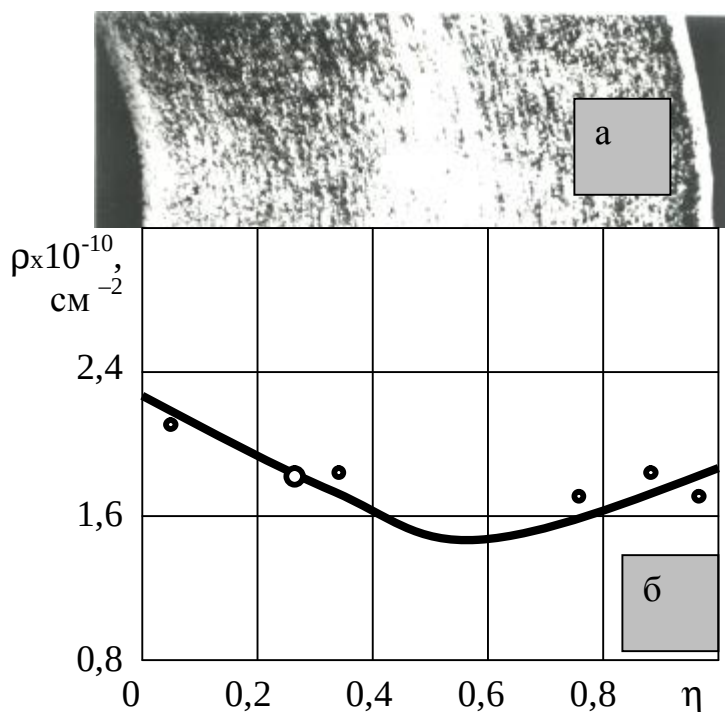
Характеристики элементов исследуемого профиля

Параметр	Номер элемента сечения профиля (рис. 4.29)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\rho \times 10^{10}, \text{мм}^2$	1,3	1,7	2,4	1,8	0,4	1,5	1,9	1,5	–	1,4	1,5	1,8	1,3
$H, \text{МПа}$	890	970	1040	970	840	960	1010	910	780	910	970	1030	860
$S, \text{мм}$	–	–	1,175	–	1,150	–	1,125	–	1,155	–	1,125	–	–

В процессе деформирования элементы профиля имеют некоторое утонение (см. табл. 4.4) по сравнению с исходным листом, что связано с обжимом заготовки по сечению в пределах 0,1 мм. Эксперимент проводили с целью изучения энергосиловых параметров процесса с обжимом, а также вопросов устойчивости процесса при наличии зазора (использовали также заготовки толщиной 1,0 мм).

Остаточные напряжения в профиле измеряли на образцах длиной 20 мм в нейтральном слое сечения профиля в продольном направлении. Поверхностные остаточные напряжения исходного листа составляли величину порядка 20-30 МПа. Эпюры остаточных напряжений приведены на рис. 4.35, откуда видно, что наибольшие остаточные напряжения приходятся на угловые зоны.

В поперечном направлении остаточные напряжения были соизмеримы с остаточными напряжениями в исходном листе. Продольные составляющие остаточных напряжений можно оценить путем измерения кривизны полос, например, шириной 2 мм после разрезки заневоленного профиля в продольном направлении. Затем расчетным путем определить соответствующие напряжения на основе известного соотношения теории упругости. Возможно также



4.34. Изменение плотности дислокаций вдоль биссектрисы угла: а) – макроструктура зоны сгиба при 90-кратном увеличении; б) – график зависимости

применение тензометрирования. В нашем случае использовался только первый способ определения остаточных напряжений.

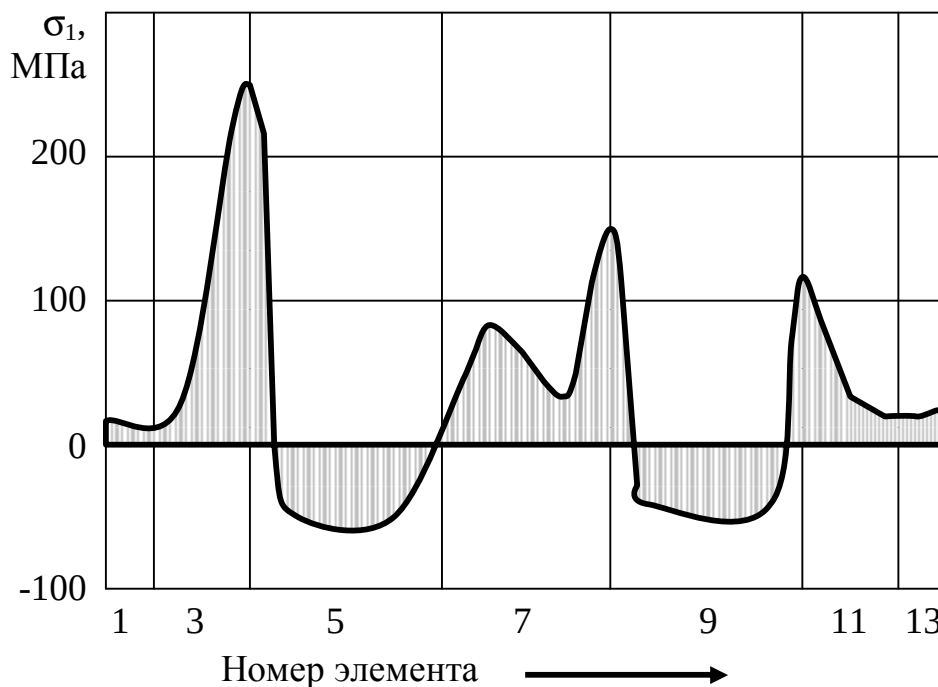


Рис. 4.35. Эпюры остаточных напряжений

Проведенные исследования показывают, что наибольшей деформации подвержены угловые зоны профиля, хотя полки также имеют значительные деформации (в пределах 10 %). Причем, как следует из табл. 4.4, полка 3 имеет значительно большую деформацию, чем полка 11, что свидетельствует о некоторой асимметрии процесса формообразования (очевидно, из-за выбора зазора в калибре). Вероятно, для вертикальных полок аналогичная асимметрия имеет место, в чем можно убедиться при анализе рис. 4.35. Асимметрия процесса формообразования обычно приводит к саблевидности или скрутке, если не применять правильное устройство. Различие деформаций в горизонтальных полках и стенке приводит к продольному прогибу профиля. Даже с правильным устройством характеристики профиля были следующими: саблевидность – 4 мм/м, прогиб – 4 мм/м, скрутка 75 град/м, что существенно превышает допустимые значения (см. п. 1.4).

Отметим, что применение тонких методов, в частности рентгеновских методов, к исследованию метода интенсивного деформирования затруднено из-за 5-процентного порога их чувствительности по деформациям.

4.6. Влияние формы инструмента на формирование угловой зоны

В п. 2.4 (рис. 2.5) установлены схемы приложения внешних сил Q_1 , Q_2 при формообразовании профиля, которым соответствуют четыре варианта приложения радиальных усилий: $Q_1 < 0$, $Q_2 < 0$ (двухстороннее обжатие), $Q_1 < 0$, $Q_2 = 0$ (посадка внутреннего контура); $Q_1 = 0$, $Q_2 < 0$ (посадка наружного контура); $Q_1 = 0$, $Q_2 = 0$ (свободное формообразование) (рис. 4.36). В работе [113] были

исследованы все четыре варианта на швеллерах профилях по схеме (рис.3.18) из материала 01420 в различных состояниях. Выбранный вид профиля легко обобщается на другие виды профилей, кроме того, ввиду простоты его конфигурации уменьшаются трудозатраты на изготовление оснастки и проведение эксперимента.

В процессе исследования использовали трапецевидные заготовки. Предельные значения ширины заготовки B_{3n} определяются формулами [407]:

$$B_{3n} = a + \frac{b-a}{L} X_d, \quad \Delta \bar{B} = (B_3 - B_k) / S_0, \quad (4.8)$$

где a, b – ширина узкого и широкого оснований заготовки соответственно; $\Delta \bar{B}$ – избыток ширины заготовки; L – длина заготовки; X_d – расстояние от узкого основания заготовки до местоположения дефектного сечения профиля; B_3, B_k – ширина заготовки и ширина развертки калибра соответственно.

В табл.4.5 приведены диапазоны предельных значений параметров зоны сгиба различных вариантов изготовления профилей.

При свободном формообразовании (табл.4.5, вариант 1) утолщение зоны сгиба не достигает больших значений, во-первых, из-за аксиальной вытяжки, а во-вторых, из-за дефектов внутреннего контура (зажимы более 100 мкм). При ограничении по внутреннему контуру (табл.4.5, вариант 3) посадка внутреннего контура на инструмент возможна лишь при небольшом избытке заготовки. При этом утолщение не превышает пяти процентов.

Увеличение ширины заготовки «отбрасывает» материал в сторону наружного контура и контакт по внутреннему контуру не имеет места. Следует отметить, что радиус скругления участка инструмента, контактирующего с внутренним контуром зоны сгиба, не должен быть большим, ибо в этом случае контакт вообще невозможен, а при малом радиусе скругления инструмента повреждается внутренний контур зоны сгиба. Конструкция инструмента для постановочных экспериментов была такова, что в одном роликовом калибре реализовывались различные сочетания радиусов скруг-

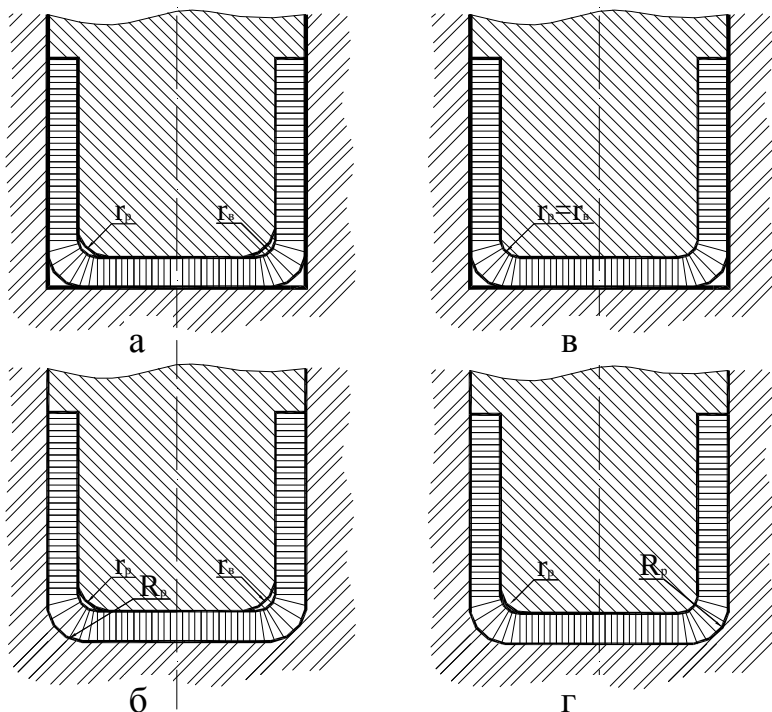


Рис. 4.36. Калибр с различными сочетаниями скругления роликов в зоне сгиба по вариантам табл. 4.4:
1 – а; 2 – б; 3 – в; 4 – г

лений согласно табл. 4.5 за счет поворота верхнего ролика на 180° вокруг вертикальной оси. Предварительное формообразование показало целесообразность исследования всех схем, однако в этом случае трудно установить влияние избытка заготовки, в связи с чем на каждый вариант пришлось изготавливать отдельные пары роликов.

Таблица 4.5

Геометрические параметры уголкового зоны

Варианты формообразования	$\overline{DB}$	$\overline{R}_n$	$\overline{r}_e$	h_f
1. $Q_1 = 0, Q_2 = 0$	0 – 0,5	–	1,0 – 2,0	1,0 – 1,10
2. $Q_1 = 0, Q_2 < 0$	0,5 – 1,5	1,5 – 2,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,15
3. $Q_1 < 0, Q_2 = 0$	0,5 – 2,0	1,5 – 2,0	0,8 – 1,2	1,05 – 1,15
4. $Q_1 < 0, Q_2 < 0$	0,5 – 1,0	–	0,8	1,0 – 1,05

Здесь $\overline{r}_b \approx \frac{a_0}{2} [k(0, h_f, a) + 1]$, где a_0 – большая полуось аппроксимирующего эллипса.

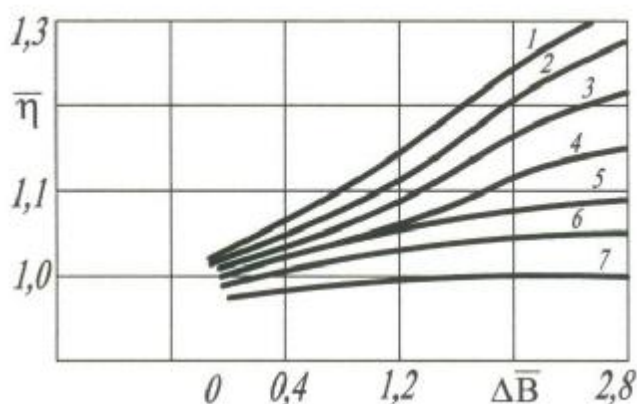


Рис. 4.37. Изменение толщин элементов профиля: 1–4 – зоны сгиба (R_n : 1 – 0,8; 2 – 1,3; 3 – 1,6; 4 – 1,8); 5 – удлинение профиля; 6, 7 – утолщение полки и стенки соответственно

Варианты 2 и 3 (табл. 4.5) являются практически равноправными при значениях наружного радиуса R_n более $1,5S_0$. На рис. 4.37 приведена зависимость относительной толщины элементов профиля от избытка ширины заготовки $\Delta \overline{B}$ для варианта с двусторонним обжатием зоны сгиба, откуда видно, что при утолщениях зоны сгиба более 15 % имеет место значительная аксиальная вытяжка материала (до 7 %). При этом полки у торцов утолщаются, а стенка утончается (происходит раскатка стенки, на что указывалось в п. 4.4 книги).

Рис. 4.38 представляет зависимость относительной толщины зоны сгиба от наружного радиуса калибра для схемы с ограничением по наружному контуру, из которого следует, что при больших значениях R_n геометрические параметры зоны сгиба приближают этот вариант к варианту со свободным формообразованием, а потому при утолщениях $\overline{\eta}_f > 1,15$ имеют место дефекты по внутреннему контуру зоны сгиба (зажимы более 100 мкм). Таким образом, из

анализа рис. 4.37 и 4.38 следует, что наиболее благоприятными вариантами формообразования являются варианты «2» и «4» (см. табл.4.5), которые позволяют получать максимальные утолщения и малые радиусы без существенных дефектов внутреннего контура.

Заполнение материалом высвобожденного пространства подчиняется, вообще говоря, законам пластического течения и зависит от значительного числа технологических факторов (вида напряженно-деформированного состояния, условий трения между заготовкой и инструментом и ряда других). Однако для случая двустороннего ограничения можно обойтись только геометрическими характеристиками зоны сгиба.

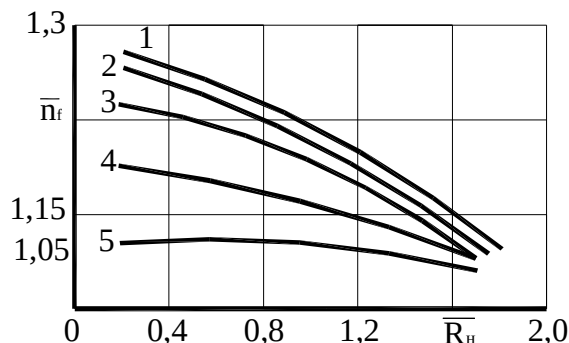


Рис. 4.38. Изменение толщины зоны сгиба при различных значениях внутреннего радиуса: кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям относительного радиуса: 2,5; 1,8; 1,2; 0,8; 0,4

Соотношение утолщения и других геометрических параметров уголкового контура при посадке контуров определяется известной формулой [33]:

$$h_f \cdot \cos \alpha = 1 - (1 - \cos \alpha)(R - r) \quad (4.9)$$

где α – угол подгибки; R , r – радиусы кривизны наружного и внутренних контуров соответственно.

Бездефектная зона сгиба еще не является гарантией получения кондиционного профиля, качество которого во многом определяется его схемой формообразования.

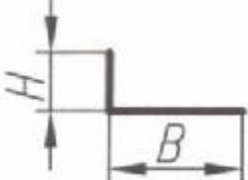
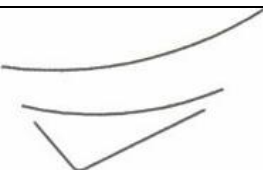
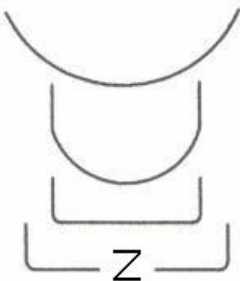
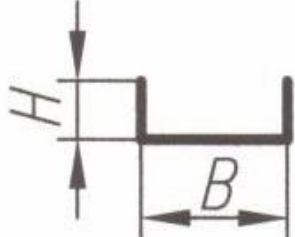
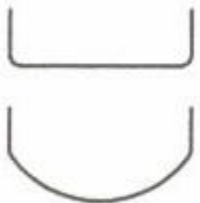
4.7. Схемы формообразования при стесненном изгибе

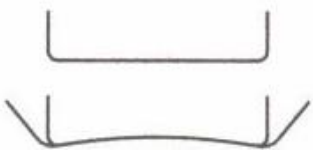
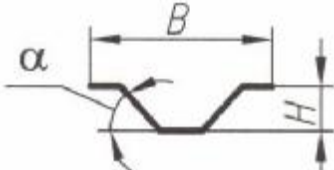
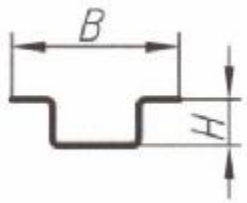
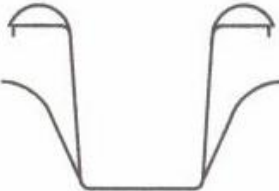
Качественный профиль с максимально возможным утолщением материала по углам характеризуется отсутствием внутренних дефектов и внешних дефектов поверхности, высокой точностью выполнения форм и сечений. Высокая эффективность технологии достигается за счет уменьшения числа переходов, простоты оснастки и настройки ее. Схема формообразования определяет конфигурацию заготовки на предварительных переходах.

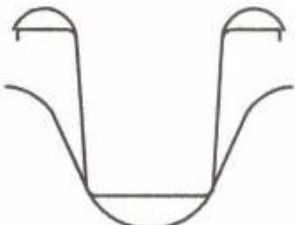
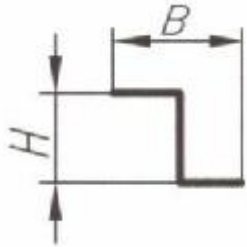
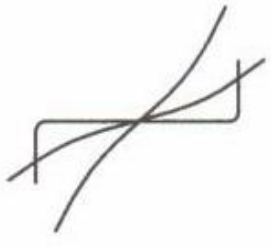
Целью отработки схем формообразования являлась минимизация числа технологических переходов. С этой целью были опробованы 22 схемы формообразования профилей высотой до 30 мм, шириной до 54 мм, толщиной до 2 мм из алюминиевых сплавов, для чего было изготовлено более 50 комплектов оснастки. Эскизы переходов и характеристики схем приведены в табл. 4.6. Анализ и количественные оценки указанных схем даны в работах [392 – 394, 395, 396, 216, 408]. Установленное количество переходов и аналитическое описание схем переходов приведено в п. 4.3 книги.

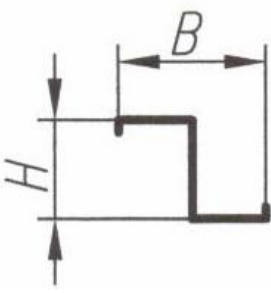
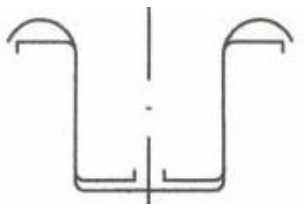
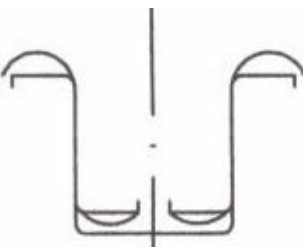
Таблица 4.6

Выбор схем формообразования профилей стесненным изгибом

№ схемы	Эскиз	Характеристика схемы
1	2	3
1.		Уголок
1.1.		Два перехода. Поводки, скрутка.
1.2.		Два – три перехода. Заклинивание профиля в калибре, намотка на ролик.
1.3.		Три – четыре перехода. Симметрия формообразования, качественная отформовка. Четвертый переход – разрезка.
1.4.		Три перехода. Отсутствие скрутки, качественная зона сгиба.
2.		Швеллер
2.1.		Два перехода. При $B/H < 1$ наблюдается волнистость кромки ($S_0 < 1\text{мм}$)

1	2	3
2.2.		Три перехода. Простота инструмента, стабильность заготовки.
2.3.		Три перехода. Схема обратная. Сложность инструмента. Применимость при $B/H > 1$.
3.		Корытообразный профиль, $\alpha < \pi/2$
3.1.		Два перехода. Закатка кромок. Увеличенный прогиб профиля.
3.2.		Два перехода. При $\alpha > 70^\circ$ $H > 30S_0$ – кромковая волнистость.
3.3.		Три перехода. Стабильность процесса, симметричность, простота инструмента. Возможна обратная схема.
4.		Корытообразный профиль с отбортовками.
4.1.		Три перехода. Кромковая волнистость, прогиб профиля.

1	2	3
4.2.		Три перехода. Подрезание кромок при входе во второй переход.
4.3.		Четыре перехода. Симметричность. Плавность переходов, высокое ка- чество. При $B/H > 1$ возможно применение обратной схемы.
5.		Зетовый
5.1.		Три перехода. Скрутка.
5.2.		Три перехода. Задиры на поверхности. Скрутка.
5.3.		Четыре перехода. См. №3.3 табл.4.6. Удовлетворительное каче- ство. Иногда скрутка после разрез- ки.

6.		Зетовый профиль с отбортовками.
6.1.		Пять переходов. Три перехода из № 4.3 табл. 4.6. Прерывание процесса, закатка нижней кромки.
6.2.		Шесть переходов. Три перехода из № 4.3 табл.4.6. Слишком большое число переходов, прерывание процесса.
6.3.		Три перехода. Кромковая волнистость.
6.4.		Четыре перехода. Благоприятные условия формообразования. Хорошее качество профиля.

Отметим особенности двух схем для формообразования уголкового профиля: схемы 1.2 и 1.4 отличаются тем, что в первом случае неравнополочный уголок формируется из симметричной заготовки, в то время как во второй схеме на предпоследнем переходе заготовка формируется исходя из условий равенства деформаций по кромкам [409], что предотвращает скрутку.

Отработку схем формообразования проводили на станках серии ГПС-200 и их модификаций в отсутствие преднамеренного задания аксиальных сил, которые существенно влияют на определение схем формообразования, хотя в

большей мере это относится к методу интенсивного деформирования, чем к стесненному изгибу.

Кроме выявленного числа переходов, необходимых для формовки сечения профиля, установлены также следующие правила проектирования схем формообразования:

- 1) Проектирование переходов следует осуществлять последовательно в направлении от готового профиля к первому переходу;
- 2) Окончательный переход надлежит составлять по чертежу профиля окончательной геометрии без учета пружинения;
- 3) Форма профилированной под стесненный изгиб заготовки должна иметь углы наклона полок и проекции полок на горизонтальную плоскость такими же, как на профиле.

Полученные результаты включены в технологические рекомендации [215, 368, 167, 410], методические материалы по проектированию инструмента [411], а также в РТМ [216].

Ввиду малых габаритных размеров конечного сечения профиля отработанные схемы формообразования обычно не приводят к существенным нарушениям процесса в диапазоне толщин материала от 1,0 до 2,5 мм. При уменьшении толщины материала следует принимать определенные технологические меры, которые отчасти базируются на соотношении протяженности зоны плавного перехода заготовки и соответствующего межклетьевого расстояния профилирующего станка.

4.8. Исследование зоны плавного перехода

Объектом исследования при стесненном изгибе являлись профили типовой номенклатуры преимущественно из алюминиевых сплавов, при использовании метода интенсивного деформирования – преимущественно профили швеллерного типа из стальных сплавов. Для сравнения приведены также результаты исследований по профилям С-образного и корытного типов. Экспериментальные исследования проводили на станках ГПС различных модификаций (см. разд. 5).

При настройке профилирующего оборудования и формующей оснастки контролировали следующие параметры:

- расположение оси профилирования в горизонтальной плоскости;
- расположение оси профилирования в вертикальной плоскости;
- расположение оси профилирования относительно базовой плоскости;
- расположение направляющего устройства;
- зазоры в формующих калибрах экспериментального оснащения;
- соответствие параметров заготовки предъявляемым к ней требованиям.

В экспериментальных исследованиях стесненного изгиба избыток ширины заготовки брали в соответствии с рекомендациями разд.6; ширина заготовки в методе интенсивного деформирования соответствовала ширине развертки калибра; зазор в роликах брали равным толщине заготовки; ось профилирования настраивали по прямой линии.

4.8.1. Протяженность зоны плавного перехода при стесненном изгибе

При разработке технологии стесненного изгиба во избежание переформовки заготовки следует выбирать параметры переходов таким образом, чтобы зона плавного перехода перед текущим (актуальным) переходом не накладывалась на предшествующий период во избежание появления дефектов профиля и производственных энергетических затрат [325]. С другой стороны, при проектировании оборудования чрезмерно большое межклетьеовое расстояние приводит к завышенной массе и габаритам технологического оборудования, предназначенного для реализации технологии. Умение априори вычислять размеры зоны плавного перехода позволяет вести процесс проектирования оборудования и роликовой оснастки оптимальным образом.

В работах [412, 314] для процессов стесненного изгиба показано, что полная энергия деформирования W заготовки на предварительном переходе складывается из работы W_y , производимой изгибающим моментом, работы подсадки полки W_n и работы W_B , создаваемой продольной силой /108/:

$$W = W_y + W_n + W_B = \frac{1}{4} \sigma_T S_0^2 \theta \left(2 - \frac{r}{R} \right) + \frac{1}{6} \sigma_T b^3 \left(\frac{d\theta}{dy} \right)^2, \quad (4.9)$$

где r , R – радиусы заготовки на предшествующем и актуальном переходах соответственно; b – ширина деформируемого участка профиля.

В соответствии с предположением о минимальной энергии произведена минимизация функционала с подынтегральной функцией (4.9) в предположении заданной относительной длины $\bar{L}$, так что на первом этапе решена задача с неподвижными концами. На втором этапе определена длина $\bar{L}$ из дополнительного условия через геометрические характеристики заготовки и технологической оснастки. Из уравнения Эйлера – Лагранжа с соответствующими граничными условиями определяется функция $\theta(y)$:

$$\theta(y) = \frac{ky^2}{2} + \left(\frac{\theta_n}{S_0 \bar{L}} - \frac{k \bar{L} S_0}{2} \right) y + \theta_0, \quad (4.10)$$

где θ_0, θ_n – углы подгибки на предшествующем и актуальном переходах; $k = 3S_0 (2 - r/R) / 4b^3$.

Из условия сопряжения участков профиля с учетом формулы (3.13) получено:

$$\bar{L} = \sqrt{\frac{8b^3 \theta_n}{3(2 - ж)}}, \quad (4.11)$$

где $ж = r/R$.

Формула (4.11) представляет собой частный случай более общей зависимости (3.56), полученной позже в работе [365].

На рис. 4.39 представлены в логарифмическом масштабе зависимости протяженности зоны главного перехода от угла θ_n при обычной гибки ($\varepsilon = 1$) и при стесненном изгибе для швеллерного профиля 14х23х1,2 мм. При малых углах подгибки влияние торцевого поджатия невелико. С увеличением угла подгибки оно становится значительным, при этом имеет место хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных. Следует заметить, что данная модель достаточно хорошо согласуется и с результатами, полученными другими авторами для случая обычной гибки. Однако при стесненном изгибе протяженность зоны плавного перехода существенно меньше, чем при традиционном профмливании.

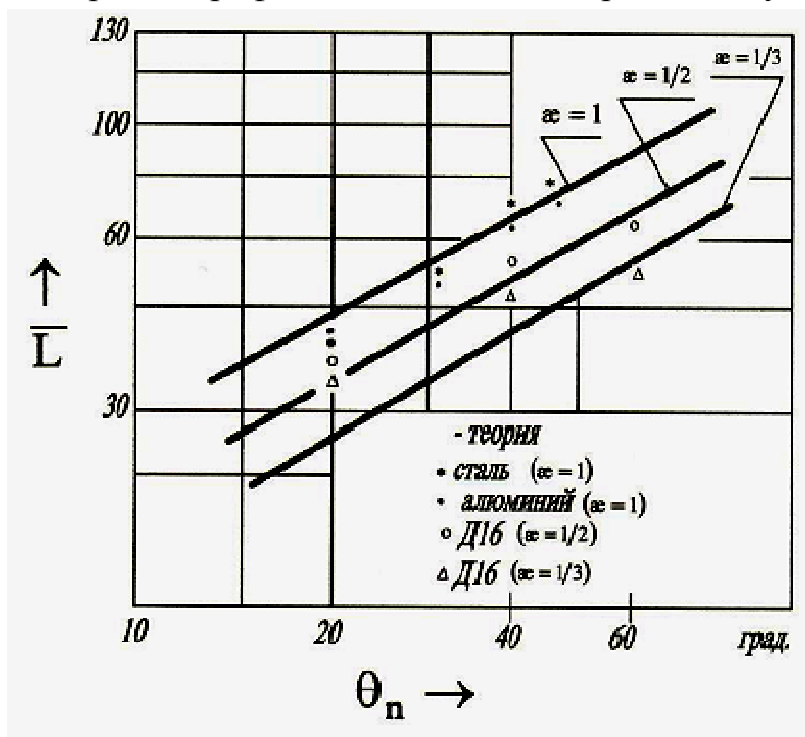


Рис. 4.39. Протяженность зоны сгиба при стесненном изгибе

4.8.2. Зона плавного перехода швеллера при использовании МИД

Экспериментальное исследование зоны плавного перехода (ЗПП) при использовании метода интенсивного деформирования описано в нашей книге [344]. Протяженность зоны плавного перехода измеряли с помощью металлической линейки, смонтированной на специальной стойке. Замеры осуществлялись с точностью до 1 мм по линейке с миллиметровой шкалой при использовании ориентирующего металлического угольника. Штангенциркулем фиксировали ширину профиля в зоне стабилизации непосредственно за парой роликов предшествующего перехода зажимным винтом и перемещали штангенциркуль вперед до появления зазора, что соответствовало отметке на полке профиля, которую наносили карандашом с толщиной стержня 0,5 мм. Схема измерений приведена на рис. 4.40.

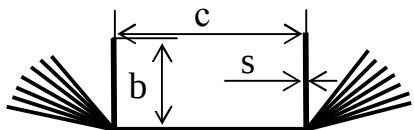
Значения радиусовгиба принимались на всех переходах равными толщине исходной заготовки, катающие диаметры роликов назначались постоянными по всем переходам. Объект исследования и факторы эксперимента представлены в табл. 4.7.

Эксперименты до начала разработки технологии на номенклатуру профилей к внедрению проводили за один переход с использованием направляющего устройства станка ГПС-350М. Ширину дна профиля принимали равной 110 мм, что было обусловлено соображениями, связанными с максимальной

жесткостью дна профиля из номенклатуры профилей, подлежащих внедрению. Применяли экспериментальные комплекты роликов, описанные в разд. 3. Материал заготовок – сталь оцинкованная. Замеры производили троекратно путем прогонки заготовки на 100–150 мм от измерения к измерению. Затем данные обрабатывали в среде MathCAD-2001 Pro, которые представлены на рис. 4.41 – 4.44 в виде линейных моделей. Отклонения экспериментальных значений от данных моделей не превышали 11 %.

Таблица 4.7

Варьируемые величины при проведении эксперимента

Эскиз сечения профиля	Варьируемые величины и их значения		
	Угол подгибки θ , град.	Толщина s , мм	Ширина полки b , мм
	20, 25, ..., 50	0,6; 0,8; 1,0; 1,2	20, 30, 40, 50

Как показывают графики на рис. 4.41 – 4.44, протяженность зоны плавного перехода существенно возрастает с увеличением ширины полки и угла подгибки. При этом для различных толщин заготовки прослеживается четкая тенденция уменьшения протяженности зоны плавного перехода с увеличением толщины заготовки (ср. абсолютные значения L на рис. 4.41 – 4.44 для одних и тех же значений ширины полки).

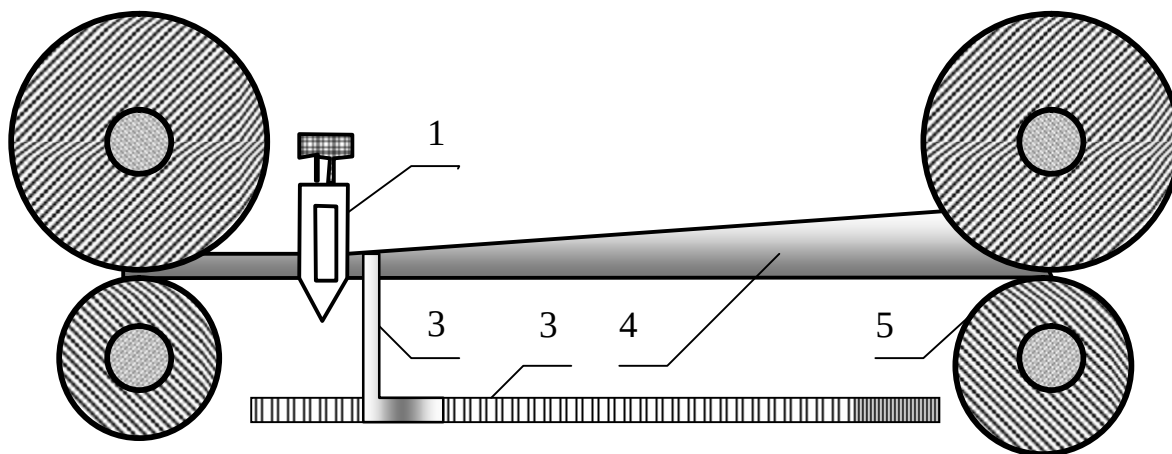


Рис. 4.40. Схема измерения протяженности зоны плавного перехода: 1 – штангенциркуль; 2 – угольник; 3 – линейка; 4 – профиль; 5 – ролик

На рис. 4.45 дано сравнение теоретических данных (сплошные линии; см. формулу (3.56)) и экспериментальных результатов (отмечены точками). Экспериментальные результаты на рис. 4.45 сняты с первых переходов с варьированием (уменьшением) ширины полки. Фактическое значение углов подгибки располагалось в пределах 18 – 20° (среднее значение угла подгибки для теоретической модели – 20°). Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышало 10 %.

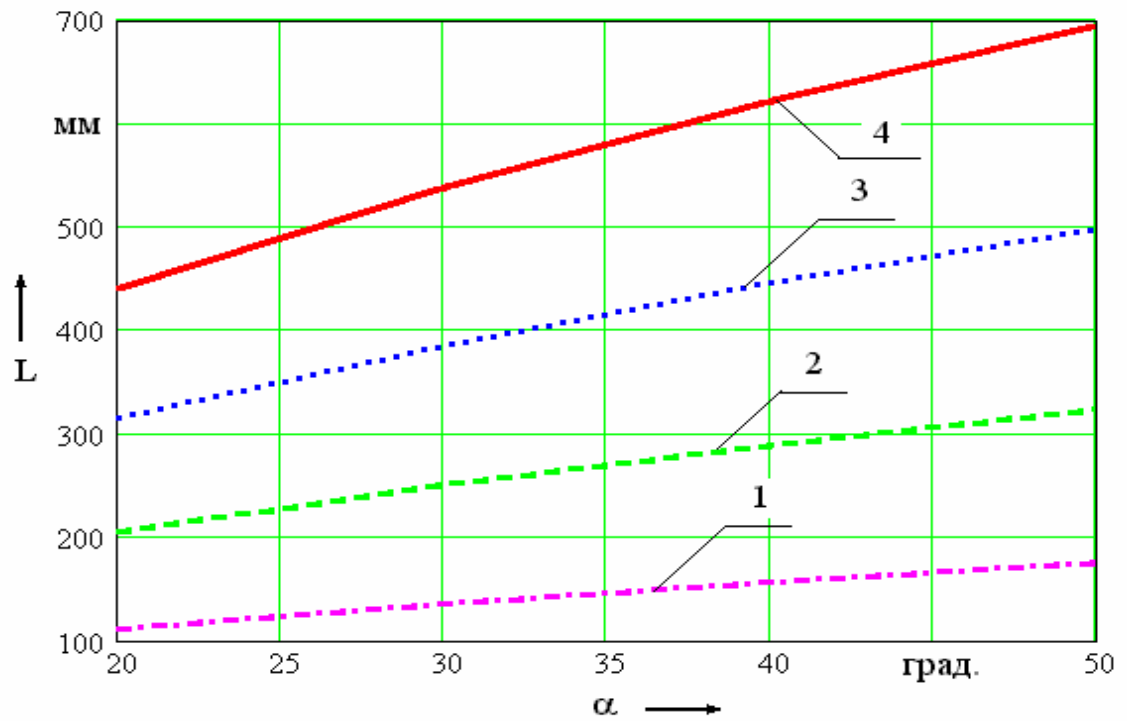


Рис. 4.41. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $C = 100$ мм и $s = 0,6$ мм:
 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

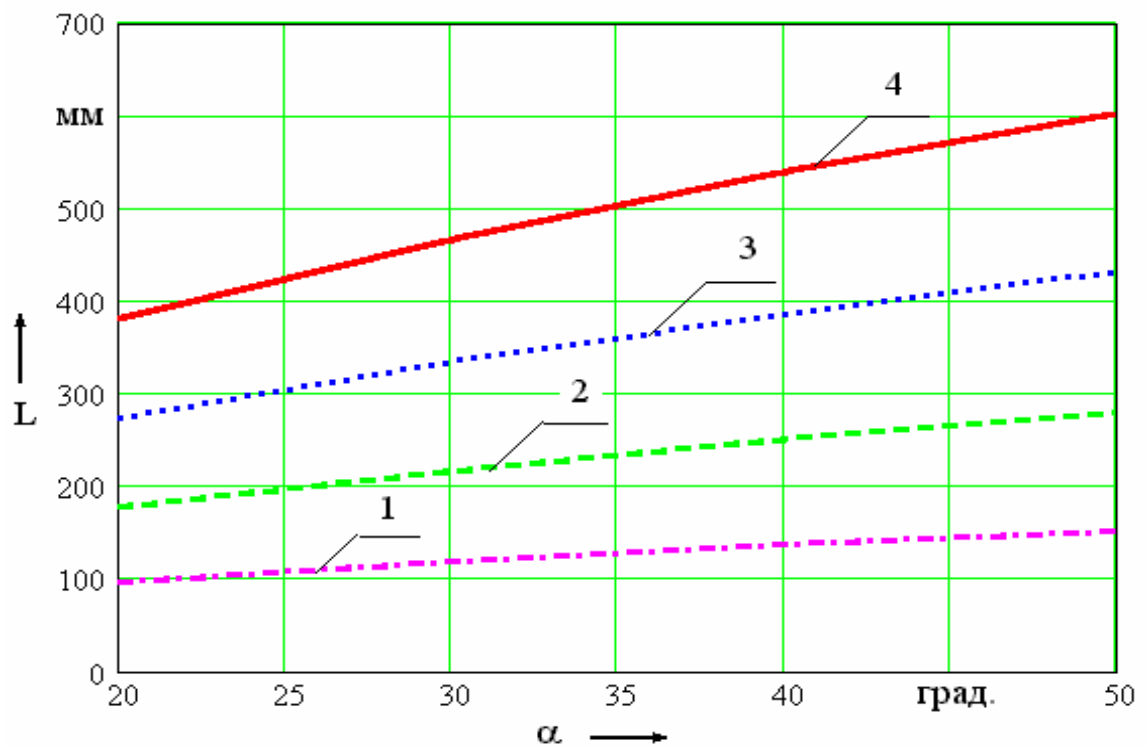


Рис. 4.42. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $s = 0,8$ мм и $C = 100$ мм: 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

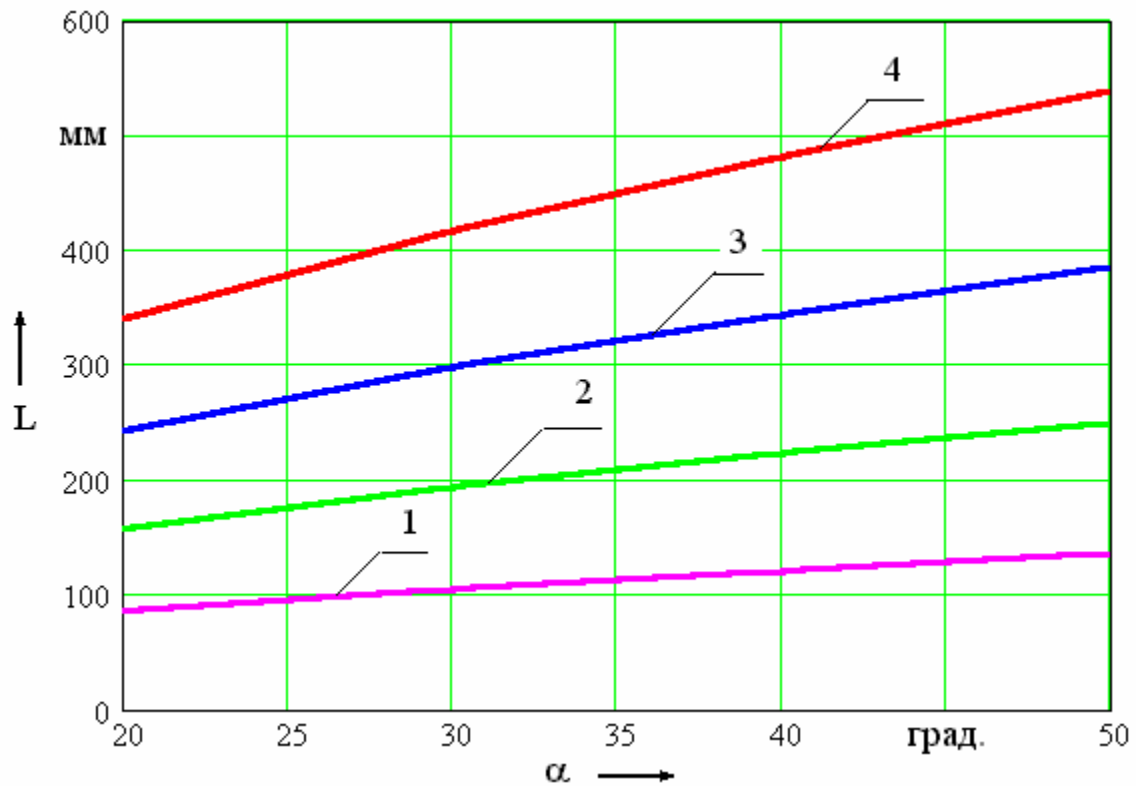


Рис. 4.43. Зависимость зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $C = 100$ мм и $s = 1,0$ мм: 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

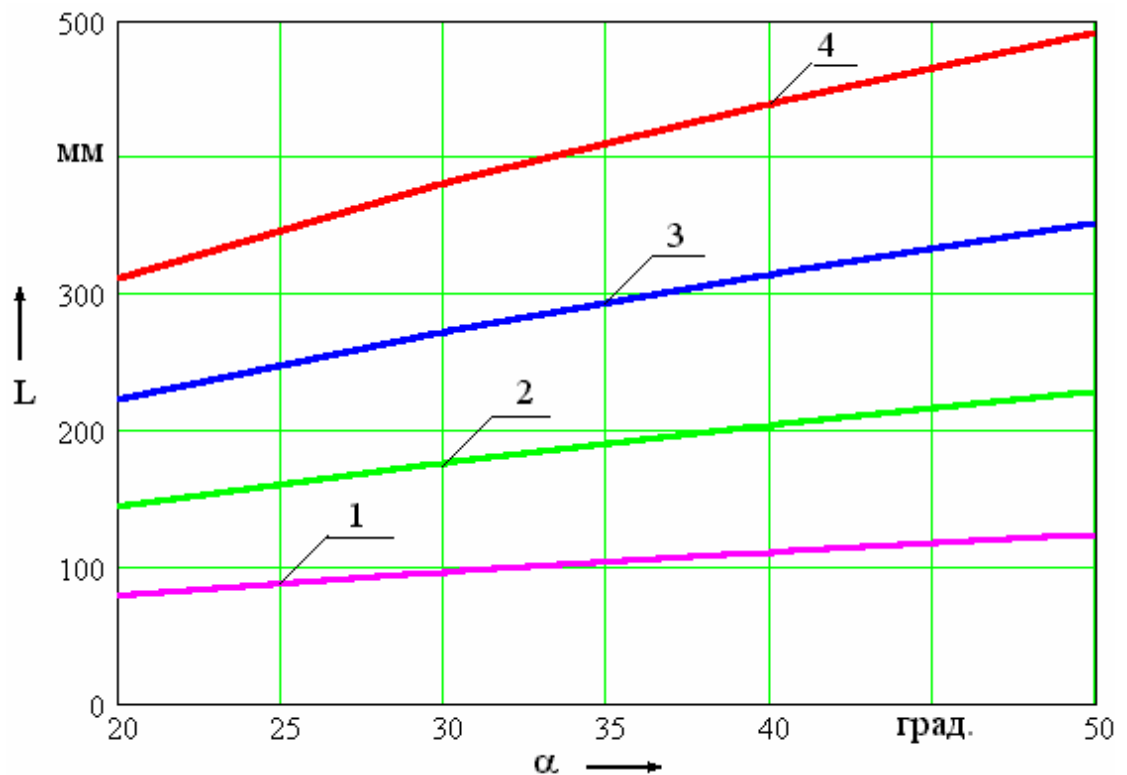


Рис. 4.44. Зависимость зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $C = 100$ мм и $s = 1,2$ мм: 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

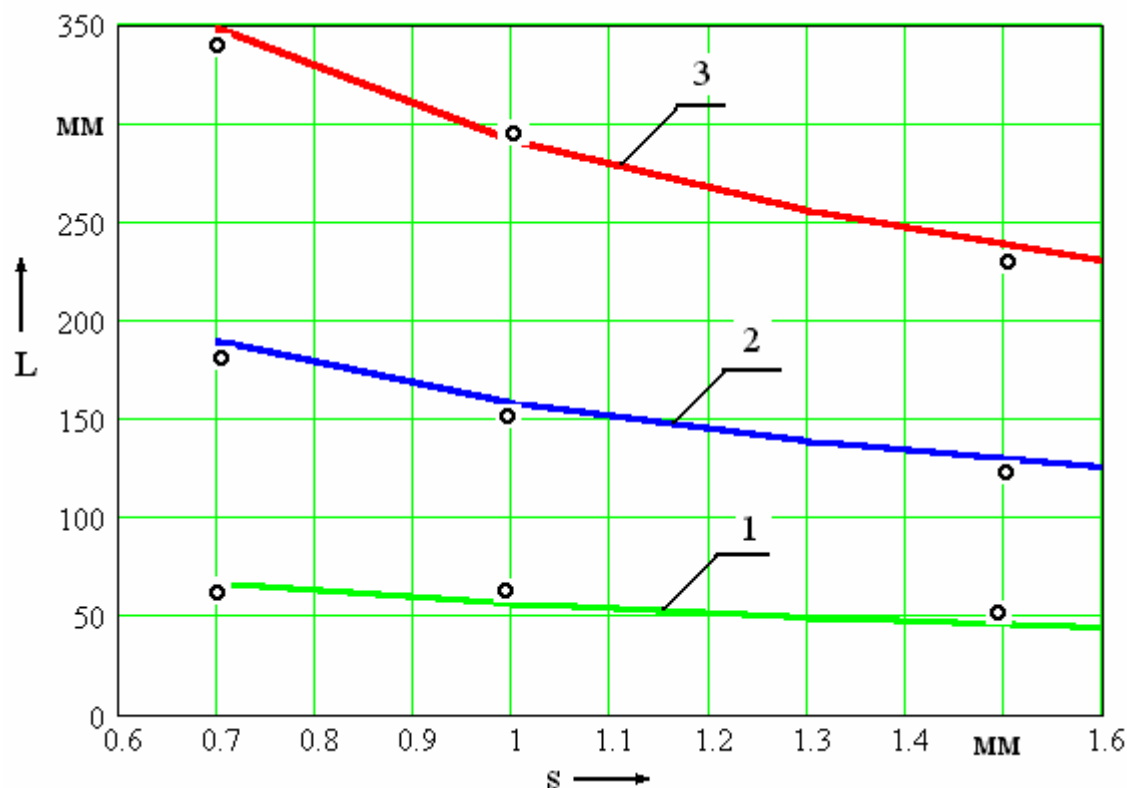


Рис. 4.45. Сравнение экспериментальных и теоретических данных по определению протяженности ЗПП при угле подгибки 20° и $C = 100$ мм: 1 – $b = 15$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 45$ мм

Сравнение результатов, полученных на профилях, изготовленных МИД, с данными модели, разработанной для стесненного изгиба, показывает их хорошее совпадение только при $ж = 1$.

4.8.3. Влияние ширины дна профиля⁷

Для установления влияния ширины дна и суммарных углов подгибки профиля на протяженность зоны плавного перехода с целью обобщения полученных результатов на более широкую номенклатуру профилей, проводили замеры протяженности зоны плавного перехода на стадии отработки технологии на каждом из переходов. Оптимизацию проведения экспериментов и их количества производили путем анализа номенклатуры профилей, подлежащих внедрению. Затем экспериментальные данные сравнивали со значениями теоретической модели и подсчитывали расхождение экспериментальных и теоретических результатов для каждого перехода по формуле:

$$\chi = \frac{L_{\text{э}} - L_{\text{т}}}{L_{\text{э}}} \cdot 100\%,$$

где $L_{\text{э}}$, $L_{\text{т}}$ – экспериментальное и теоретическое значение протяженности зоны плавного перехода соответственно.

⁷ Подготовка оснастки, профилирование заготовок, замеры выполнены Филимоновым С.В.

Наличие отклонений измеряемого параметра лишь в одну сторону от теоретических данных во всех переходах отмечалось соответствующим знаком «+» или «-». В других случаях указан лишь модуль максимального отклонения.

Результаты замеров протяженности зоны плавного перехода для различных типоразмеров профилей приведены в табл. 4.8 – 4.13. При изготовлении уголкового профиля с шириной полок 15 и 30 мм (табл. 4.8) использовали два перехода, в то время как при изготовлении профиля с шириной полок 45 мм применяли три перехода.

Табл. 4.8 показывает, что с увеличением ширины полки протяженность зоны плавного перехода увеличивается, причем, отклонение экспериментальных данных от теоретических результатов имеет тенденцию к увеличению с уменьшением толщины заготовки. При толщине заготовки менее 1 мм отклонение всегда имело отрицательное значение. Очевидно, это объясняется характером асимптотики в формуле (3.56) по толщине заготовки.

Таблица 4.8

Протяженность зоны плавного перехода уголкового профиля

№ опыта	b, мм	θ, град.			L, мм			ξ, %
		Номер перехода			Номер перехода			
		1	2	3	1	2	3	
s = 0,7 мм								
1	15	25	20	—	72	65	—	(–) 8,3
2	30	25	20	—	202	184	—	(–) 5,9
3	45	20	15	10	333	292	236	(–) 4,5
s = 1,0 мм								
4	15	25	20	—	63	56	—	(–) 3,6
5	30	25	20	—	174	156	—	(–) 2,9
6	45	20	15	10	297	258	211	2,8
s = 1,2 мм								
7	15	25	20	—	54	48	—	(+)3,7
8	30	25	20	—	144	128	—	(–)2,3
9	45	20	15	10	237	205	167	(–2,1)

В табл. 4.9 и 4.10 приведены данные замеров протяженности зоны плавного перехода профилей с шириной дна 110 и 195 мм соответственно. Полученные результаты подтверждают тенденции зависимости величины L от толщины материала и ширины полки, однако наблюдается и устойчивая закономерность в отклонениях экспериментальных данных от теоретических (см. последнюю колонку табл. 4.9 и 4.10).

Как показали дальнейшие исследования, указанные закономерности не являются случайными, а связаны с дополнительным эффектом, сопровождающим процесс формообразования тонкостенных профилей. Установлено, что при формообразовании тонкостенных профилей с широким дном (например, при $C/s > 100$) возникает «эффект желобчатости» – прогиб донной части профиля, позволяющий назначать более жесткие режимы подгибки для таких профилей

по сравнению с профилями, имеющими соизмеримые ширину полки и ширину дна (см. табл. 4.11).

Анализ табл. 4.11 показывает, что тенденция отклонений реальной протяженности зоны плавного перехода от теоретических значений не прослеживается и по переходам имеются отклонения как в одну, так и в другую сторону. Из рассмотрения последних колонок табл. 4.10 и 4.11 следует, что «эффект желобчатости» явно выражен лишь для профилей с толщиной стенки менее 1 мм.

Таблица 4.9

Протяженность зоны плавного перехода швеллерных профилей при $c=110$ мм

№ опыта	S, мм	L, мм						ξ, %
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
b = 30 мм								
1	0,7	192	180	164	158	148	134	(-)9,4
2	1,0	162	156	142	131	118	109	(-)8,2
3	1,2	146	137	129	119	111	104	(-)4,5
4	1,5	132	128	114	108	102	94	5,3
b = 45 мм								
5	0,7	352	334	300	274	262	246	(-)7,8
6	1,0	331	296	252	233	212	199	(-)6,6
7	1,2	272	253	228	217	203	190	5,2
8	1,5	242	227	210	188	173	168	4,7

Таблица 4.10

Протяженность зоны плавного перехода швеллерных профилей при $c=195$ мм

№ опыта	S, мм	L, мм						ξ, %
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
b = 30 мм								
1	0,7	184	170	160	156	141	127	(-)13,7
2	1,0	157	144	136	122	114	105	(-)11,6
3	1,2	138	131	124	115	109	101	(-)7,3
4	1,5	126	117	110	106	101	92	5,4
b = 45 мм								
5	0,7	348	326	293	272	262	240	(-)10,4
6	1,0	321	307	244	226	209	188	(-)8,7
7	1,2	267	242	229	231	204	182	7,2
8	1,5	236	228	207	191	176	161	6,1

При больших толщинах имеются отклонения разных знаков. В дальнейшем, при разработке технологии следует учитывать этот эффект, который позволяет в первом приближении увеличивать углы подгибки по переходам на 1,5 – 2 градуса на каждые 100 мм ширины дна профиля в пределах ширины дна до

250 мм. Этот эффект также объясняет потребность в большем числе переходов при изготовлении профиля с узким дном по сравнению с производством профиля, имеющего широкую донную часть, а также более частое появление кромковой волнистости на полках профилей с узким дном.

Таблица 4.11

Протяженность зоны плавного перехода швеллерных профилей при $c \approx b$

№ опыта	S, мм	L, мм						ξ, %
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
1*	0,6	189	178	169	161	147	134	3,6
2**	1,0	162	151	145	138	122	112	4,1
3**	1,5	146	139	134	129	117	104	3,3
4***	2,5	132	124	119	115	106	93	5,2
* – c = b = 28 мм (Москва – «Центр кровли»)								
** – c = b = 30 мм (Москва)								
*** – c = b = 32 мм (Сызрань)								
Опыт 2 – Зазор в калибре 1,5 мм								

4.8.4. Зона плавного перехода С-образного и корытного профиля

При изготовлении С-образного профиля оценку протяженности зоны плавного перехода производили с использованием следующего алгоритма. Подсчитывали протяженность зоны плавного перехода для первых трех переходов как и для швеллерного профиля с шириной подгибаемой полки, равной суммарной ширине боковой и горизонтальной полки по готовому профилю. На трех последующих переходах к расчетной протяженности зоны плавного перехода боковой полки прибавляли протяженность зоны плавного перехода горизонтальной полки, умноженной на фактор жесткости, аналогичный фактору, определяемому формулой (3.74).

Замеры действительной протяженности зоны плавного перехода (табл. 4.12) дают отклонения от расчетных значений в пределах 17 %. Усредненные значения протяженности зоны плавного перехода приведены в последних колонках табл. 4.12.

Таблица 4.12

Протяженность зоны плавного перехода С-образных профилей
при $b=45$ мм, $g=13$ мм

№ опыта	S, мм	L, мм						Среднее L_{Σ} , мм
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
с = 145 мм								
1	0,7	315	283	261	251	238	228	312
		55	49	47	52	44	39	
2	1,0	293	273	254	238	219	208	291
		51	46	40	37	42	42	

№ опыта	S, мм	L, мм						Среднее L _Σ , мм
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
3	1,2	262	245	234	216	202	189	261
		44	41	38	31	34	28	
4	1,5	230	211	195	188	180	167	231
		41	36	39	37	32	31	
с = 200 мм								
5	0,7	302	273	252	239	226	211	288
		43	37	34	41	38	33	
6	1,0	291	271	248	231	212	202	279
		41	38	34	33	35	37	
7	1,2	255	246	219	200	194	187	252
		37	34	35	35	32	36	
8	1,5	221	209	192	176	167	164	219
		34	31	27	29	30	31	
В верхней ячейке – значение L подгибаемой полки; в нижней ячейке – значение L периферийного элемента								

Аналогично предыдущему были выполнены расчеты и для корытного профиля (табл. 4.13), указывающие на отсутствие переформовки заготовки при изготовлении профиля за шесть переходов. Следует заметить, что с увеличением горизонтальных полок применяемый алгоритм подсчета дает значительную ошибку (20 % и более), а потому возникает задача создания более надежного алгоритма подсчета протяженности зоны плавного перехода для профилей с числом зон сгиба более четырех с использованием локальных характеристик жесткости элементов профиля.

Таблица 4.13

Протяженность зоны плавного перехода корытного профиля 103×27×20 мм

S, мм	L, мм						Среднее L _Σ , мм
	Номер перехода						
	1	2	3	4	5	6	
0,7	148	136	127	132	133	128	243
	104	98	93	91	86	87	
В верхней ячейке – значение L подгибаемой полки; в нижней ячейке – значение L периферийного элемента							

Указанные проблемы в определении локальных характеристик жесткости не являлись предметом специального рассмотрения в настоящей работе, хотя нами уже получены некоторые обнадеживающие результаты, касающиеся установления закономерностей формообразования многоэлементных профилей с использованием данного подхода.

4.9. Анализ профилей, имевших дефекты при их обработке

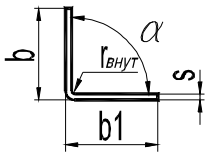
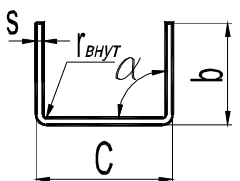
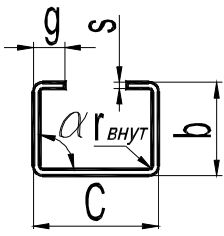
Для выявления подверженности профилей дефектам типа кромковой волнистости [161, 162, 344] при обработке технологии был проведен статистический анализ более трехсот типоразмеров профилей и условий их формообразования с помощью пакета Microsoft EXCEL 97. В табл. 4.14 указана номенклатура анализируемых профилей и характеристики их поперечных сечений. Исследуемые профили изготавливались на различном профилегибочном оборудовании [413, 37], приведенном в табл. 4.15.

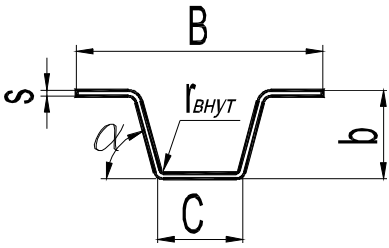
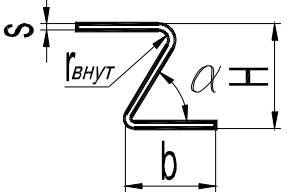
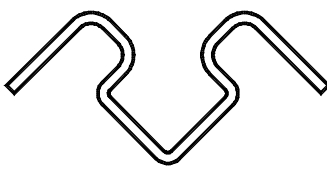
Анализ проводили на основе журналов технологической обработки профилей, содержащих следующую информацию:

- 1) Чертеж сечения профиля, материал профиля.
- 2) Марка оборудования, число задействованных клеток.
- 3) Отклонения параметров технологического оснащения и их изменение в процессе обработки.
- 4) Режимы настройки оборудования (направляющего и правильного устройств, форма линии профилирования).
- 5) Отклонения размеров профиля, вид дефектов.

Таблица 4.14

Параметры исследуемых профилей

№	Типовой представитель (сечение)	Параметры профилей	Материалы
1	2	3	4
1	Уголок 	$b = 10 \div 70 \text{ мм};$ $b_1 = 10 \div 70 \text{ мм};$ $\alpha = 45 \div 135^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	Сталь: 3, 08кп, 08пс, 08ю, оцинкованные стали, стали с поли- мерными по- крытиями, ок- рашенные, ла- минированные.
2	Швеллер 	$b = 5 \div 50 \text{ мм};$ $C = 10 \div 220 \text{ мм};$ $\alpha = 45 \div 135^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	
3	С – образный 	$b = 10 \div 50 \text{ мм};$ $g = 5 \div 30 \text{ мм};$ $C = 10 \div 200 \text{ мм};$ $\alpha = 75 \div 135^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	

1	2	3	4
4	Корытообразный 	$b = 20 \div 50$ мм; $C = 15 \div 120$ мм; $B = 40 \div 150$ мм; $\alpha = 30 \div 90^\circ$; $s = 0,5 \div 3,0$ мм; $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S$.	
5	Z-образный 	$b = 5 \div 40$ мм; $H = 15 \div 160$ мм; $\alpha = 45 \div 135^\circ$; $s = 0,5 \div 3,0$ мм; $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S$.	
6	Специальной формы 	Число зон сгиба – до 12; Ширина заготовки – до 350 мм; $\alpha = 5 \div 180^\circ$; $s = 0,5 \div 3,0$ мм.	

Виды потери устойчивости периферийных элементов некоторых типов профилей показаны на рис. 4.16. Как указывалось выше, подавляющее число случаев потери устойчивости периферийных элементов профилей проявляется в форме кромковой волнистости.

Таблица 4.15

Основные параметры оборудования

№	Модель	Количество клетей, шт.	Межклетье- расстояние, мм	Скорость профи- лирования м/мин
1	ГПС 200М11	4	200	4÷20
2	ГПС 350	4	400	
3	ГПС 350 М6	6	400	
4	ГПС 350 М8	8	400	

На рис. 4.47 представлены результаты статистических исследований изготовления профилей гибкой прокаткой, показывающие соотношение общего количества отработанных профилей определенного типа и количества профилей, имевших дефекты в форме кромковой волнистости.

Анализ показал [344], что на отечественном рынке востребованы профили швеллерного типа (до 32 %) и специальной формы (до 26 %), суммарная доля профилей остальных четырех групп составляет менее 50 %, при этом проблема кромковой волнистости особенно актуально стоит для профилей швел-

лерного типа и специальной формы рис. 4.48. Отработка технологии производства профилей указанной номенклатуры показывает, что кромковая волнистость зависит от применяемого оборудования, геометрии профиля, схем и режимов формообразования. Качественный анализ не позволил выявить влияние механических свойств заготовки на кромковую волнистость. Установлено, что для наиболее общей номенклатуры профилей высотой до 50 мм (до 70 % от общего количества) достаточным является шесть переходов.

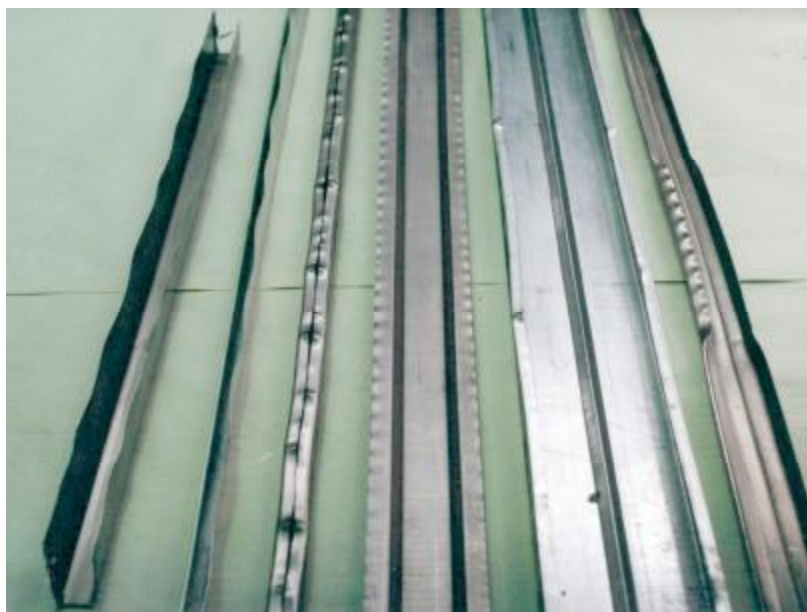


Рис. 4.46. Потеря устойчивости периферийных элементов профилей

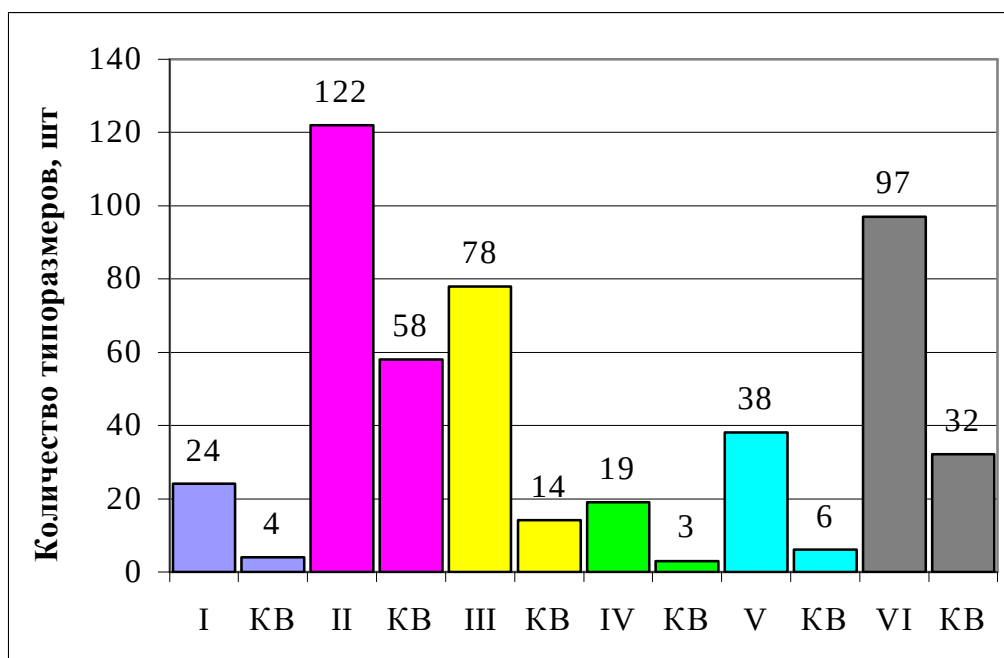


Рис. 4.47. Результаты исследований: I – уголок; II – швеллер; III – С-образный; IV – корытообразный; V – Z-образный; VI – специальной формы. KB – количество типоразмеров профилей, подверженных кромковой волнистости

Было предварительно определено, что возникновение кромковой волнистости возможно при следующих значениях относительной ширины подгибаемой полки профиля b/s при схемах и режимах, характерных для процесса профилирования: уголок: при $b/s \geq 50$; швеллер: при $b/s \geq 40$; С-образный: при $b/s \geq 50$, $g/s \geq 30$; корытообразный: зависимость не установлена; Z-образный: предположительно зависит от b/s и a ; специальной формы: при $s < 1.5$ мм, количество зон сгиба больше семи.

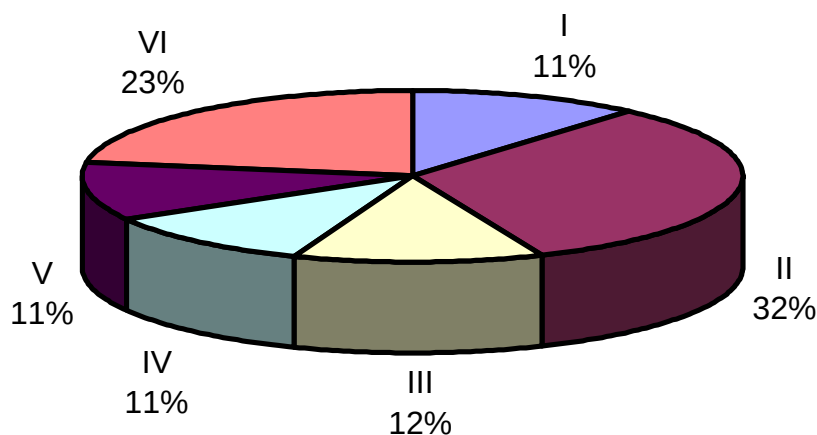


Рис. 4.48. Удельная доля профилей различных групп подверженных кромковой волнистости: I – уголок; II – швеллер; III – С-образный; IV – корытообразный; V – Z-образный; VI – специальной формы

В ряде случаев возникновение кромковой волнистости напрямую связано с превышением предельно допустимых углов подгибки за переход.

4.10. Определение предельных углов подгибки за один переход

Влияние углов подгибки на возникновение кромковой волнистости исследовали в соответствии с методикой, изложенной в работах [414, 344]. Для определения предельных углов подгибки при формообразовании заготовки за один технологический переход и параметров кромковой волнистости были проведены серии экспериментов с использованием станка ГПС-350М6 [37] с характеристиками, приведенными в разд. 5.

Исследования проводили на профилях швеллерного типа (рис. 4.49), для чего было изготовлено пятнадцать пар формирующих роликов (с углами подгибки 20, 25, 30, . . . , 85, 90°), с последующей, индивидуальной пригонкой их под каждую толщину материала.

В качестве исходной заготовки для изготовления профилей и образцов использовались листы из стали 08кп (в состоянии поставки) толщиной 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 мм. Применялись заготовки длиной 2 и 7 метров, в зависимости от вида испытания. Для каждого опыта использовалось не менее

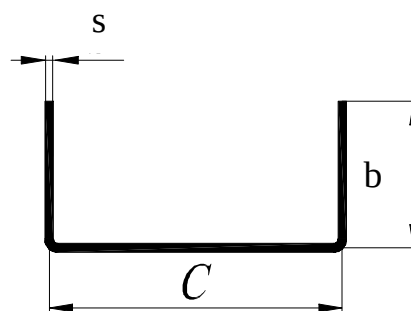


Рис. 4.49. Экспериментальный профиль базовой конфигурации: s – толщина материала, C – ширина донной части профиля ($C = 100$ мм), b – высота полки профиля

двух заготовок. Все заготовки маркировались ударным методом. Схема проведения экспериментов представлена на рис. 4.50.

Состав опытов представлен в табл. 4.16. Этапы работ и исходные данные представлены в табл. 4.17. Сочетание факторов и их уровней, при проведении экспериментов, использовали во всех возможных комбинациях.

Таблица 4.16

Исходные данные для проведения эксперимента

Варьирование факторов	s, мм	b, мм	α , град
Верхний уровень	1,2	50	60
Нижний уровень	0,6	20	20
Интервал варьирования	0,2	10	5

Заготовки (по два образца на каждый опыт) подвергали профилированию за один переход. После каждого очередного опыта заготовки подвергались выходному контролю в соответствии с разработанной методикой, и корректировался план экспериментов согласно методу Бокса-Уилсона [415].

Проведению экспериментов предшествовал анализ процессов формообразования отработанных ранее сорока восьми наиболее репрезентативных типоразмеров профилей для качественной оценки потери устойчивости их периферийных элементов в сопоставлении с используемыми режимами оборудования. Проведенный анализ способствовал более рациональному ведению экспериментов и, следовательно, минимизации их количества, а также более компетентной оценке полученных результатов.

По результатам проведенных экспериментальных исследований были построены соответствующие графики (рис. 4.51), иллюстрирующие влияние факторов процесса на предельные возможности формообразования [161]. В табл. 4.18 приведены результаты экспериментальных исследований процесса формообразования листовой заготовки за один технологический переход.

Их анализ свидетельствует о том, что в условиях эксперимента допустимый угол подгибки увеличивается при меньших значениях высоты полки и больших значениях толщины металла. Следовательно, при разработке схем формообразования, углы подгибки элементов сечения профиля за один технологический переход следует принимать в зависимости от высоты подгибаемого участка и толщины профилируемой заготовки.

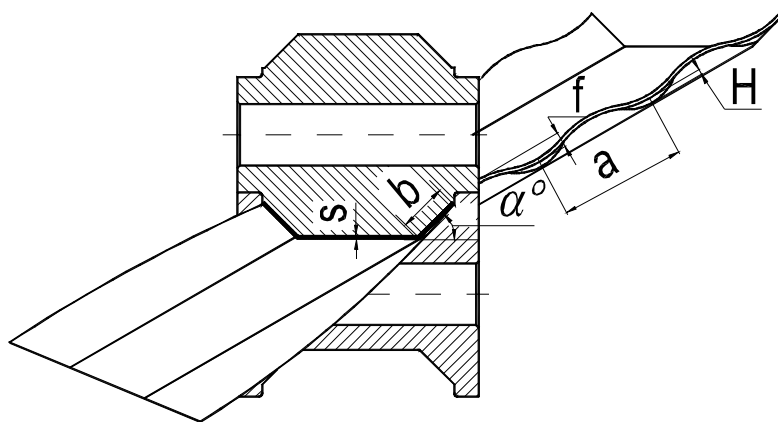


Рис. 4.50. Определение максимального угла подгибки за один переход формообразования

Состав опытов по предельным углам подгибки

№	Содержание этапов исследований	Оборудование и инструменты	Варьируемые факторы	Зависимые параметры
1	2	3	4	5
1	Исследование предельных углов подгибки при формообразовании заготовки за один переход	Гибочно-прокатный стан ГПС-350	$S = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 \text{ мм}$ $H = 20, 30, 40, 50, 60 \text{ мм}$ $\alpha = 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 \text{ град.}$	Кромковая волнистость – наличие / отсутствие; $\theta_{\text{крит}}$ – предельный угол подгибки за переход, град.
2	Исследование параметров кромковой волнистости при формообразовании заготовки в за-критической области	Гибочно-прокатный стан ГПС-350, универсальные мерительные средства	$S = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 \text{ мм}$ $H = 20, 30, 40, 50, 60 \text{ мм}$ Цикл: $\alpha_{\text{крит}, i} = \alpha_{\text{крит}, i-1} + 5 \text{ град.}$	f – амплитуда кромковой волнистости, мм a – период кромковой волнистости, мм H_p – глубина проникновения кромковой волнистости, мм $\theta_{\text{крит}, i}$ – соответствующий угол подгибки, град.

Полученные в экспериментах предельные углы подгибки могут служить в качестве оценки предельно допустимых углов подгибки. Как следует из производственного опыта, реально назначаемые углы подгибки на 30 – 40 % меньше предельных (см. рис. 4.51). Наличие периферийных элементов жесткости в виде, например, отбортовок, позволяет несколько увеличивать назначаемые углы подгибки [341, 344].

Для установления соответствия параметров кромковой волнистости уравнению (3.97) были проведены постановочные эксперименты по физическому моделированию процесса потери устойчивости полок на экспериментальном ручном прессе ПИГПЛУ-1 [416, 417], спроектированном и изготовленном в Ульяновском государственном техническом университете (рис. 4.52). Длину заготовок брали равной межклетьевому расстоянию профилегибочного станка ГПС-300М6.

Испытанию подвергали 16 заготовок (по две заготовки на каждый из 8 типоразмеров) швеллерных профилей с толщиной стенок 0,6; 0,8 и 1,0 мм с шириной полок от 20 до 45 мм и шириной дна 50 мм. Оценка перемещения траверсы прессы с пересчетом к деформации в сопоставлении с параметрами кромковой волнистости показали удовлетворительное соответствие формулы (3.97) экспериментальным данным. При сравнении с параметрами кромковой волни-

стости из табл. 3.14 шаг и амплитуда волны имели отклонения в пределах 23 %, в то время как глубина волны имела отклонение преимущественно в большую сторону до 17 %. Это связано, по-видимому, с различием НДС в реальном процессе и моделируемом.

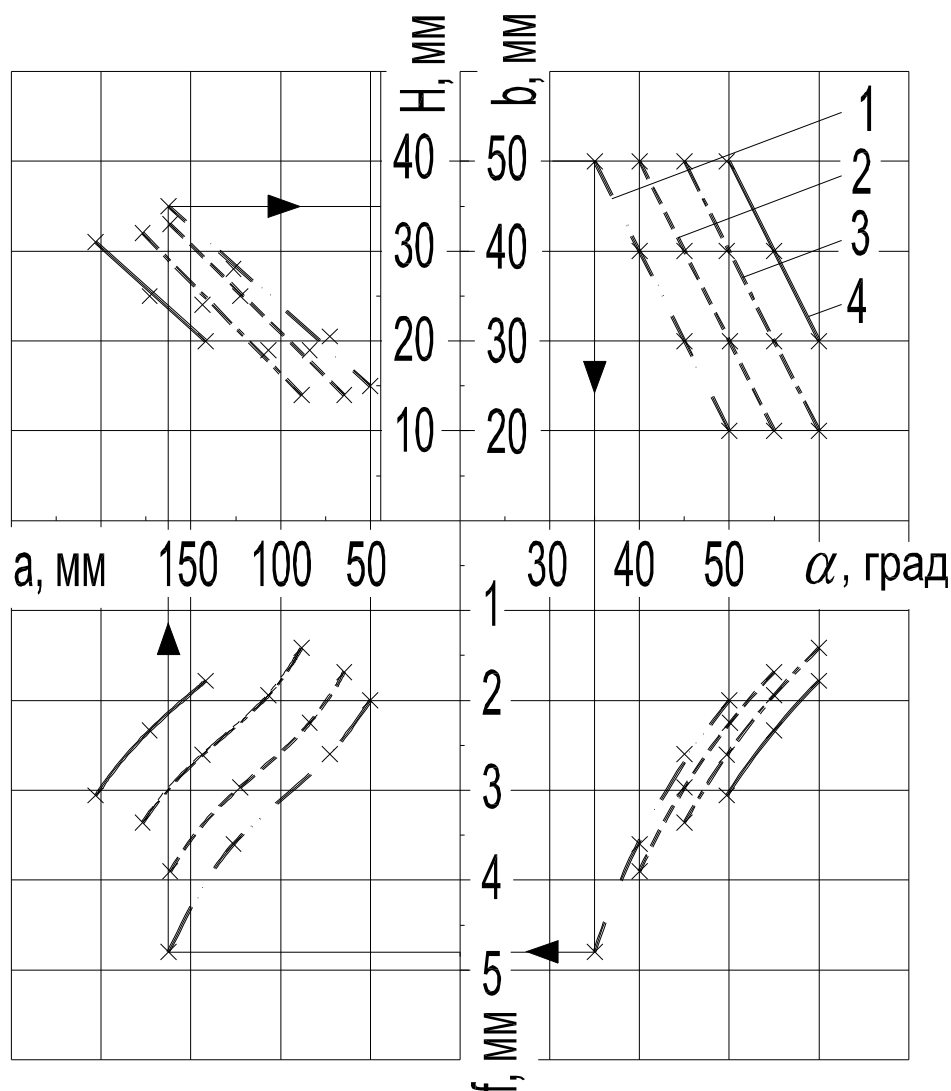


Рис. 4.51. Номограмма для определения критических углов подгибки и параметров кромковой волнистости при формообразовании заготовки за один технологический переход: $\alpha_{\text{крит}}$ – критический угол подгибки, f – амплитуда кромковой волнистости, a – период кромковой волнистости, H_p – глубина проникновения пластических деформаций; 1, 2, 3, 4 – $s = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ мм соответственно

Отметим, что на результаты испытаний большое влияние оказывают условия на торцах профиля. При испытании профилей с толщиной стенки менее 0,6 мм их торцы следует заливать легкоплавким сплавом (например, сплавом Вуда). Наличие возможности изменения угла ориентации поворотного стола обеспечивает имитацию приложения момента и сжатия профиля, аналогично условиям, в которых находится заготовка в межклетьевом пространстве при реальном процессе профилирования.

Результаты экспериментальных исследований
по определению предельного угла подгибки

№	Варьируемые параметры			Параметры кромковой волнистости		
	s, мм	b, мм	$\theta_{\text{крит}}$, град	f, мм	a, мм	H _p , мм
1	0,6	20	50	2,0	50	15
2	0,6	30	45	2,6	72	21
3	0,6	40	40	3,6	126	28
4	0,6	50	35	4,8	163	35
5	0,8	20	55	1,7	65	14
6	0,8	30	50	2,3	84	19
7	0,8	40	45	3,0	123	25
8	0,8	50	40	3,9	162	33
9	1,0	20	60	1,4	88	14
10	1,0	30	55	2,0	107	19
11	1,0	40	50	2,6	144	24
12	1,0	50	45	3,4	176	32
13	1,2	20	-	-	-	-
14	1,2	30	60	1,8	142	20
15	1,2	40	55	2,4	173	25
16	1,2	50	50	3,0	203	31

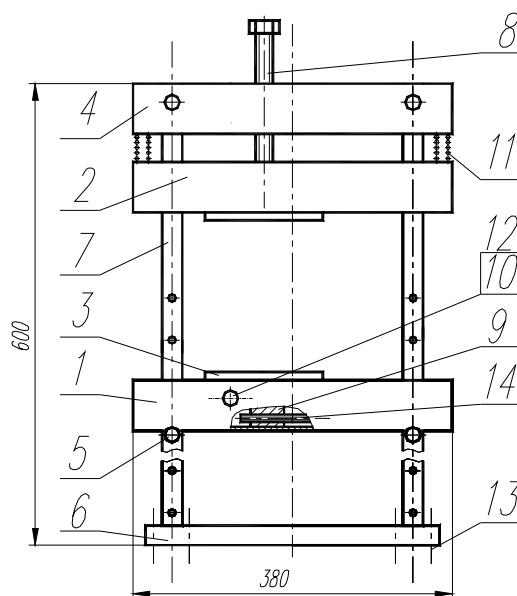


Рис. 4. 52. Экспериментальный пресс ПИГПЛУ-1: 1 – траверса регулируемая; 2 – траверса силовая; 3 – нижний установочный стол поворотный; 4 – замыкающий профиль; 5 – штифт силовой траверсы регулируемой; 6 – основание пресса; 7 – стойка – направляющая; 8 – винт нажимной; 9 – клин подвижный; 10 – штифт-ось нижнего установочного столика; 11 – пружина возвратная; 12 – шплинт штифта-оси 10; 13 – винт крепежный; 14 – винт перемещения клина регулировки угла поворота столика 3

4.11. Оценка деформаций подгибаемых полок при использовании МИД

Экспериментальное исследование деформаций подгибаемых полок вызывает известные трудности в связи с малостью пластических деформаций (в пределах 1 %). Тензометрирование дает существенные погрешности в связи с продольным изгибом заготовки, кроме того, исследования требуют выреза кольцевых пазов в роликах, что искажает реальный процесс формообразования. Метод сеток и метод отверстий также не приводят к удовлетворительным результатам из-за малости деформаций.

4.11.1. Косвенный метод оценки деформаций полок

Наиболее приемлемым методом оценки деформаций полок является регистрация продольной кривизны профиля (по выходу его из текущей клетки при условии отсутствия последующих клеток) с пересчетом ее к максимальной деформации полок по формулам (3.90) – (3.92).

На рис. 4.53 представлена схема проведения экспериментальных исследований при формообразовании профилей швеллерного типа из мягких оцинкованных сталей, в которых варьируемыми факторами были толщина заготовки, углы подгибки за переход в третьем и пятом переходах. В качестве параметра регистрировали стрелу прогиба профиля на заданной базовой длине после третьего перехода (в отсутствие последующих клеток) и после окончательного перехода в отсутствие правильного устройства. Эксперименты проводили на профилях шириной 50 и 195 мм с шириной полки 45 мм на заготовках толщиной 0,6; 0,8 и 1,0 мм с использованием базовых углов подгибки полок согласно работе [153]. Значения суммарных углов подгибки α_k указаны в верхней части рис. 4.53. Длина заготовок составляла 2200 мм.

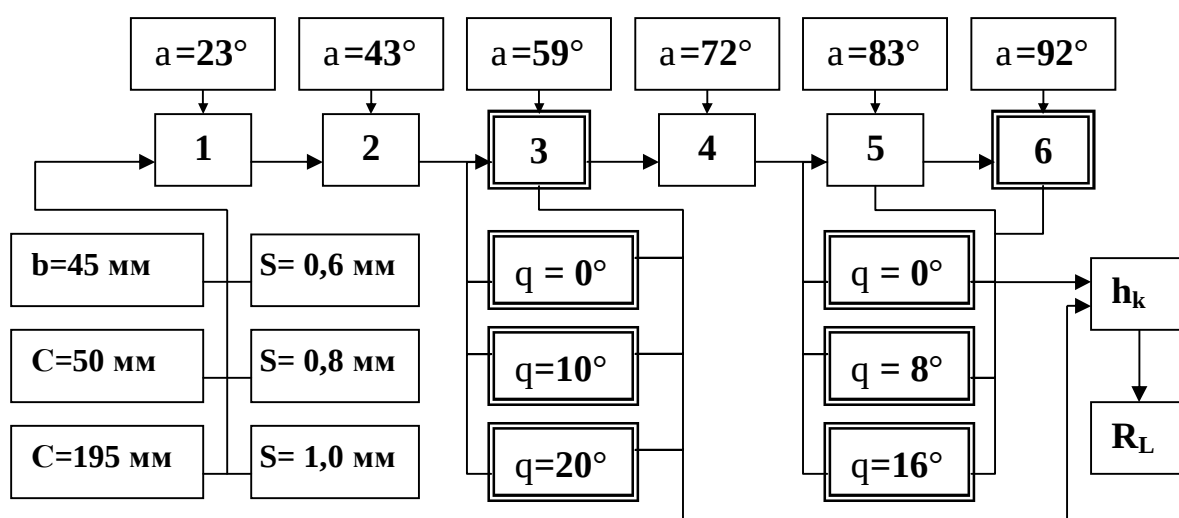


Рис. 4.53. Схема проведения экспериментальных исследований

Варьируемые факторы выбирали из соображений целесообразности для обобщения результатов на разработку технологии формообразования 32 профилей для фирмы «ИНСИ» (г. Челябинск). Применяли сборную оснастку (рис. 4.54) для заявленной номенклатуры профилей с целью ее последующего использования в производственных условиях. Исключение составляли четыре па-

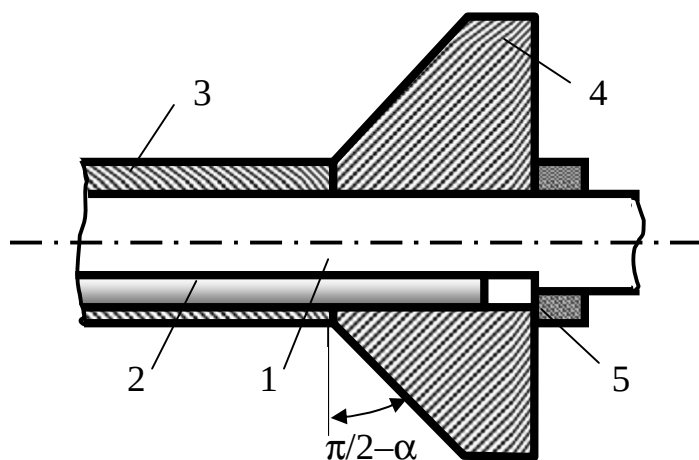


Рис. 4.54. Сборная оснастка для проведения экспериментов: 1 – вал станка; 2 – шпонка; 3 – базовая деталь ролика; 4 – гибочный конус; 5 – упорная втулка

ры боковых конусов сборных роликов для изучения влияния промежуточных углов (см. рис. 4.53). Ширина полки не изменялась по следующим причинам: во-первых, номенклатура профилей, подлежащих изготовлению, содержала только указанную выше ширину полки; во-вторых, для установления условий локальной потери устойчивости профиля существенное значение имеет относительная ширина полки, а не абсолютная.

При проведении экспериментов использовали гибочно-

прокатный станок ГПС-300М6 и необходимое количество пар формирующих валков, которые устанавливали на валы последних клеток при демонтированном правильном устройстве. В качестве направляющего устройства применяли свободную клетку с установкой на ее рабочие валы гладких роликов. Использование последних клеток обусловлено соображениями обеспечения свободного выхода двухметрового профиля, имеющего некоторую продольную кривизну. Измерение прогибов профиля определяли на стойке (рис. 4.55) с базой 1000 мм, снабженной индикатором часового типа. Для уменьшения погрешности из-за влияния конечного участка профиля контролировали изменение прогибов по длине профиля их трехкратным измерением при продольном перемещении профиля по стойке. Разброс величины прогибов для профилей толщиной 0,6 и 0,8 мм не превышал 0,12 мм, а профилей толщиной 1,0 мм – 0,16 мм. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.19.

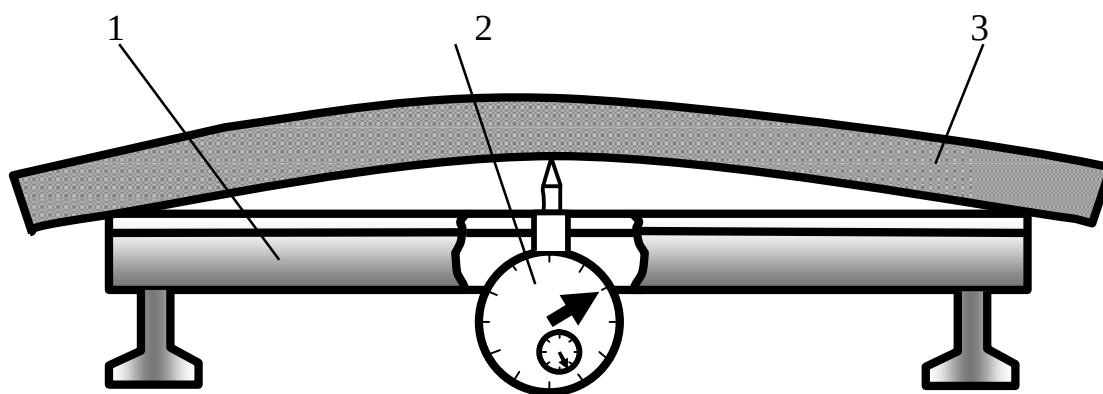


Рис. 4.55. Стойка для измерения прогибов профиля: 1 – стойка; 2 – индикатор часового типа; 3 – профиль

В соответствии с формулами (3.90) – (3.92) с использованием пакета MathCAD-2001 Pro выполнен рис. 4.56 для пересчета прогибов профиля к продольным деформациям полок. Ввиду сложности напряженно-

деформированного состояния заготовки в роликовом калибре возможны некоторые отличия полученных из эксперимента деформаций и реальных деформаций полок в свободной и контактной зонах, тем не менее установленные деформации вполне соизмеримы с расчетными деформациями подгибаемых полок (см., например, рис. 3.21 и 3.11). Кроме того, анализ табл. 4.19 подтверждает, что ширина донной части профиля оказывает влияние на деформационные параметры полок и, соответственно, на число переходов (ср. значения прогибов для ширины дна 50 и 195 мм; см. также разд. 3.11 и 4.7).

Таблица 4.19

Зависимость прогиба профиля от углов подгибки

Толщина, S_0 , мм	Ширина дна C , мм	Стрела прогиба h_k в мм при углах подгибки за переход q , измеренных в градусах					
		0	10	20	0	8	16
0,6	50	0,46	2,44	3,26*	0,62	2,84	3,16
	195	0,34	1,26	3,04*	0,44	1,72	2,22
0,8	50	0,52	2,60	3,42	0,50	2,38	3,96
	195	0,40	1,72	2,54*	0,32	2,06	2,84
1,0	50	0,44	2,14	3,48	0,38	2,44	4,10
	195	0,28	1,64	2,74	0,32	1,92	3,42
Суммарный угол гиба α в градусах		43	53	63	72	80	88
Номер конечного перехода		3	3	3	5	5	5

* – склонность к «развалу»

4.11.2 Измерение твердости полок профиля по методу Виккерса

Для оценки уровня накопленной деформации элементов профиля производили измерение их твердости. Образцы вырезали из соответствующих участков швеллерных профилей 50x50x1,5 мм из стали 3 и 110x45x0,6 мм из стали 08кп, заливали в легкоплавкий сплав, производили их шлифование, а затем производили измерения на приборе ПМТ-3 по стандартной методике по методу Виккерса. На образцах первого профиля производили замеры твердости исходной заготовки (что соответствует нулевому переходу на рис. 4.57) и боковой поверхности полок на расстоянии 4–6 мм от кромки после каждого из переходов. Замеры производили троекратно с последующим усреднением и определением среднеквадратичной ошибки в среде EXCEL 97.

Значения твердости на рис. 4.57, свидетельствуют о том, что хотя и наблюдается тенденция твердости к росту с номером перехода, однако это изменение не является значительным. Большую часть эффекта упрочнения скорее следовало бы отнести на счет сгиба и разгиба полки в межклетьевом простран-

стве, чем на продольное растяжение. Малое упрочнение подтверждает, что деформации полки при формообразовании профиля незначительны.

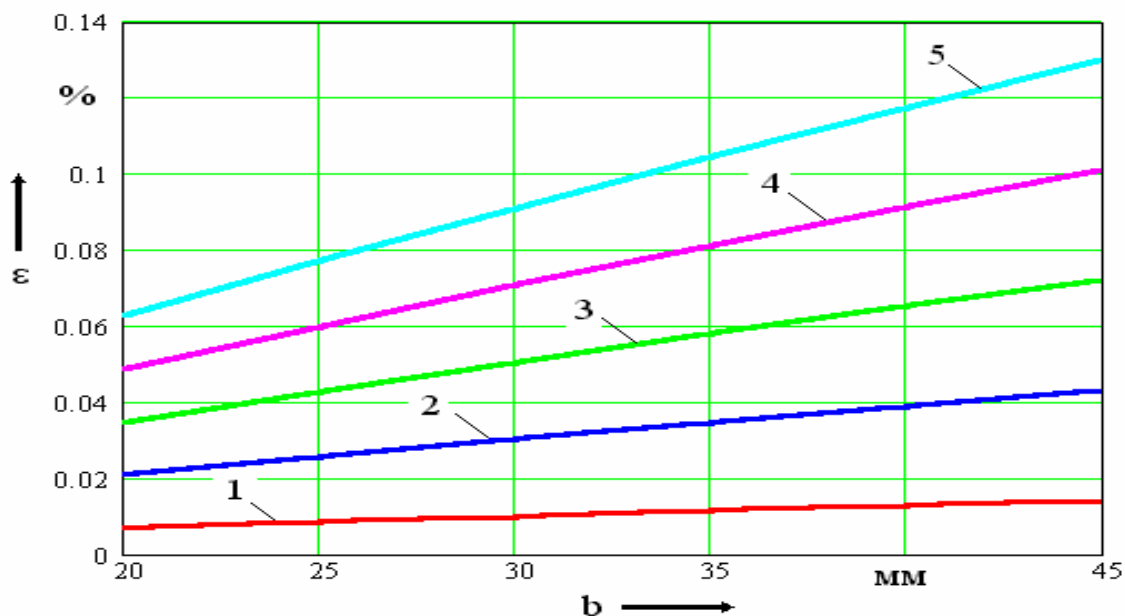


Рис. 4.56. График пересчета прогибов профиля h к деформациям полки: 1, 2, 3, 4, 5 – $h = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5$ мм соответственно

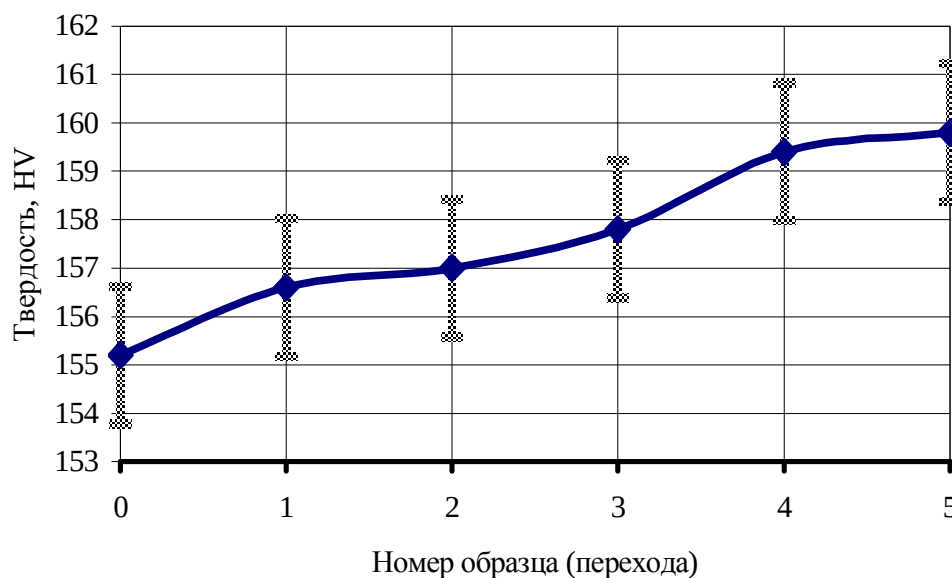


Рис. 4.57. Твердость полки профиля 50x50x1,5 из ст 3

Для второго профиля производили замеры твердости полки в нижней и верхней части полки после каждого перехода, дна профиля после окончательного перехода, а также исходной заготовки. Партия образцов, подвергнутых измерениям, показана на рис. 4.58.

Результаты измерений приведены на рис. 4.59. Здесь буквы «н» и «в» при номере перехода относятся к нижней и верхней части полки соответственно. Как и в предыдущем случае, здесь также можно видеть тенденцию твердости к росту с увеличением номера перехода. Причем, наблюдается регулярность в

соотношениях твердости нижней и верхней частей полки. Относительно большой разброс значений твердости и ее слабое изменение дают основание ограничиться лишь качественным анализом тенденций изменения твердости и не прибегать к количественным связям твердости и интенсивности деформаций [418]. Повышение твердости к последнему переходу составляет, как видно из рис. 4.57 и рис. 4.59, величину порядка 3 – 4 %.

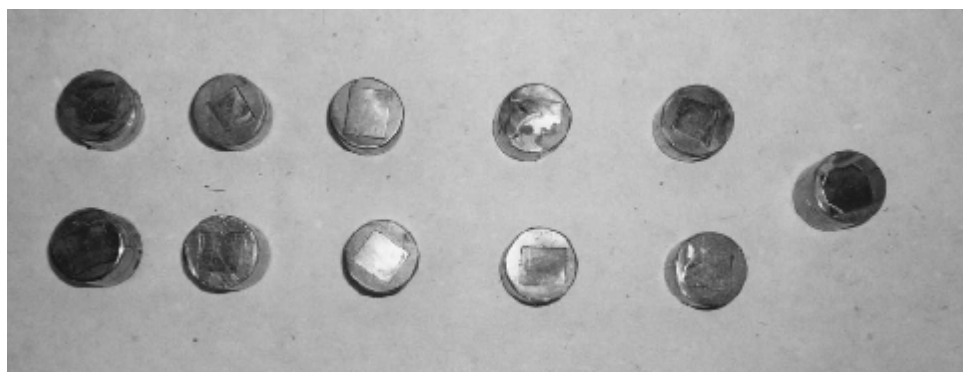


Рис. 4.58. Образцы элементов профиля 110×45×0,6 мм

В работе [406] показано, что твердость в зоне сгиба заготовки существенно увеличивается в зависимости от схемы формообразования (маршрута подгибки), причем увеличение твердости с углом подгибки становится менее выраженным при уменьшении толщины заготовки. К сожалению, данные по твердости подгибаемых полок в этой работе отсутствуют, как, впрочем, и ссылки на ширину подгибаемой полки и используемый материал. Для схем стесненного изгиба вопрос изменения твердости элементов профиля достаточно хорошо изучен в работе [27].

Анализ распределения твердости по внешней поверхности готового покрытного профиля [27] показывает, что на подгибаемой полке увеличение твердости составляет до 5 %, в то время как твердость донной части и исходной заготовки практически совпадают. Увеличение твердости в уголковогой зоне превышает 15 %. Близость оценок изменения прочности в указанных работах свидетельствует о невысоком уровне деформаций подгибаемых полок.

Отметим, что деформации подгибаемых полок толщиной 2 – 5 мм достаточно хорошо изучены в процессах традиционного профилирования [201]. Однако и здесь текущий уровень деформаций при ширине полок до 60 мм не превышал 1,8 % в момент изгиба полки профиля на входе калибра. Остаточные деформации вообще были практически нулевыми. Надлежит отметить тот факт, что при проходе через калибр подгибаемые элементы могут подвергаться знакопеременной деформации, что в большинстве случаев связано с углами захода и выхода профиля в роликовый калибр. Указанные углы можно изменять как настройкой станка, так и выбором положения оси профилирования.

Деформации подгибаемых полок, зависящие от ряда уже рассмотренных факторов, также зависят и от ширины дна профиля («эффект желобчатости» по нашей терминологии).

Рис. 4.59. Твердость элементов профиля по Виккерсу

4.12. Влияние прогиба донной части профиля

Для сопоставления теоретической модели, изложенной в п. 3.9 работы проведено изучение обнаруженного эффекта [379, 344]. Исследованию подлежали процессы изготовления профилей швеллерного типа из стали с гальваническим и органическим покрытием. С целью минимизации затрат исследования проводили *in vivo* при отработке технологии производства профилей для ряда российских предприятий, в том числе ЗАО «ИНСИ» (г. Челябинск), для которого разработано и внедрено в 2001 – 2002 гг. около 50 типоразмеров гнутых профилей. В табл. 4.20 представлена сокращенная номенклатура профилей, подлежащих исследованию.

Таблица 4.20

Типоразмеры профилей для исследования

№ профилей	b, мм	C, мм	Примечания
1-15	30, 45, 60	50 – 210	$r_B = 1$ мм; $s_0 = 0,7$ мм
16-32	30, 45, 60, 70	50 – 210	$r_B = 2$ мм; $s_0 = 1$ мм

Предметом исследования являлись характеристики прогибов донной части профилей в межклетьевом пространстве по переходам (в работе представлены данные только по второму переходу (рис. 4.60)) и условия «смягчения» режимов подгибки за счет прогибов дна профиля. Для измерения прогибов донной части профиля использовали устройство индикаторного типа (ГОСТ 577-68) с диапазоном измерения до 5 мм и точностью 0,01 мм, которое монтировалось на специальной стойке с возможностью продольного перемещения. При отработке технологии проводили замеры и вносили результаты в протоколы исследований. Затем анализировали характер зависимости максимального прогиба от углов подгибки, ширины полки, дна и толщины заготовки. Частные модели получали параболической аппроксимацией данных в среде EXCEL 97 при уровне адекватности 0,99 (см. рис. 4.60). Обобщенные данные исследований прогибов отражают формулы (3.107), (3.112 – 3.113). Для профилей с шириной стенки 110, 150 и 200 мм, шириной полки 45 мм и толщиной 0,6 мм были проведены исследования, связанные с предварительной накаткой продольного треугольного рифта 20x15 мм в средней части заготовки перед профилированием с теми же режимами подгибки, что и для аналогичных профилей с гладким дном. При углах подгибки более 30 градусов наблюдалась потеря устойчивости подгибаемых полок перед третьим переходом, а при углах подгибки от 23 до 30 градусов полки теряли устойчивость по выходу профиля из правильного устройства. При этом донная часть имеет характер двустороннего развала, что свидетельствует о значительных нагрузках, приводящих ее в пластическое состояние и о несоответствии режимов условиям благоприятного формообразования. Отсюда следует, что жесткая донная часть заготовки с рифтами требует менее жестких режимов подгибки, чем гладкое дно профиля. Это означает, что выверенные практикой режимы подгибки, применяемые для профилей с соизмеримыми размерами подгибаемых полок и ширины дна, в применении к формообразова-

нию профилей с широким дном могут быть существенно ужесточены. Фактически реально назначаемый угол подгибки будет «ослаблен» за счет прогиба донной части заготовки.

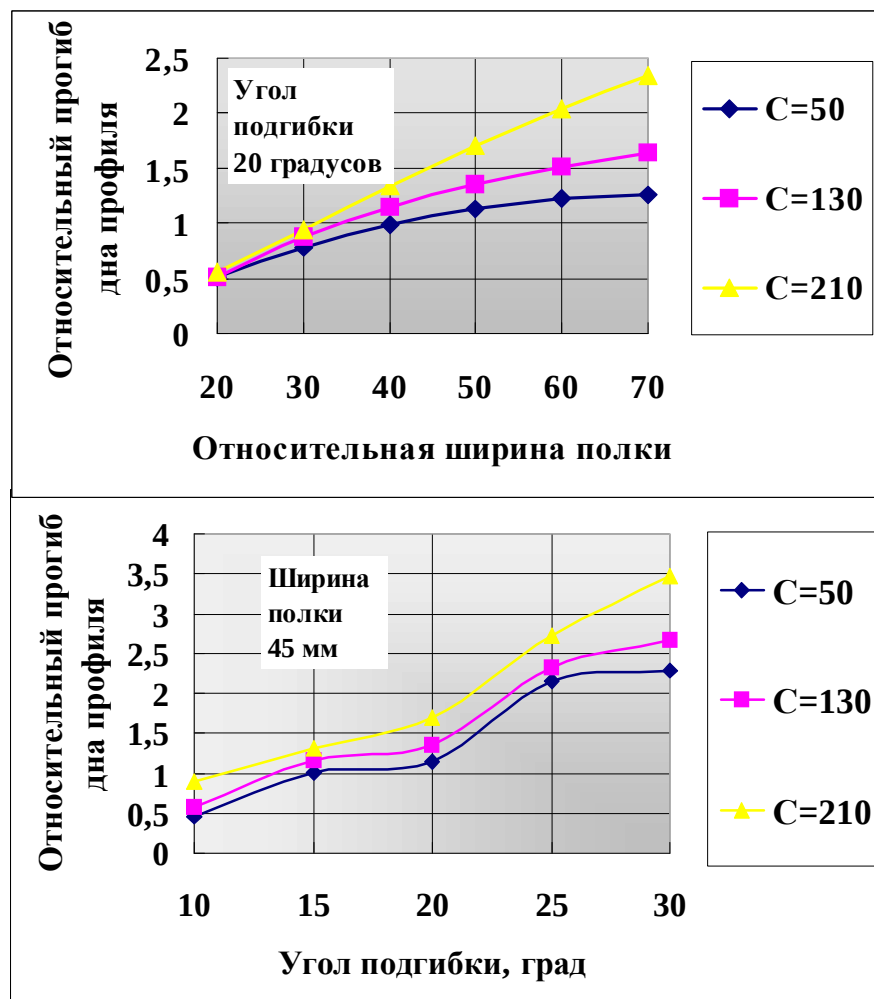


Рис. 4.60. Зависимость прогиба дна профиля от ширины подгибаемой полки и угла подгибки

шающем уравнении в аппроксимированном виде в соответствии с рис. 4.60. Во всем диапазоне изменения ширины подгибаемой полки невязка не превышала 10 %, что хорошо иллюстрирует рис. 3.34. Для последующих переходов невязка достигала величин 17,4 % (третий переход) и 22,4 % (четвертый переход). Для последних двух переходов расчеты не выполнялись в связи с малой величиной прогибов донной части профиля и, следовательно, большой относительной ошибкой в их измерении. Из рис. 3.34 видно, что предельный момент практически в два раза превышает момент от перерезывающих сил. Это означает, что уголко́вая зона приходит в пластическое состояние лишь вблизи текущего перехода, по-видимому, до места максимального выпучивания дна с отсчетом от осевой плоскости текущего перехода.

Из формулы (3.112) следует, что максимальный поворот сечения уголка имеет место в центре выпученного участка, уменьшаясь при движении к краям.

При проверке адекватности построенной модели в проведенных расчетах параметров заготовки из оцинкованной стали по формуле (3.102) с использованием соотношений (3.103), (3.104) и (3.108 – 3.111) по программе, выполненной в среде MathCAD-2001, не учтено упрочнение, а в соотношениях (3.104) и (3.111) принято $n = 0$ и $s_2 = s_s$. Анизотропией также пренебрегали, полагая все коэффициенты анизотропии равными 0,5 (для пластического состояния). Левую часть уравнения (3.102) представляли в виде невязки по величине прогибов, которые использовались в разре-

Однако, уголкового участка профиля, примыкающего к осевой плоскости, как уже обсуждалось выше, испытывают пластическое кручение, в то время как более удаленные от осевой плоскости участки уголкового зоны находятся в упругом состоянии.

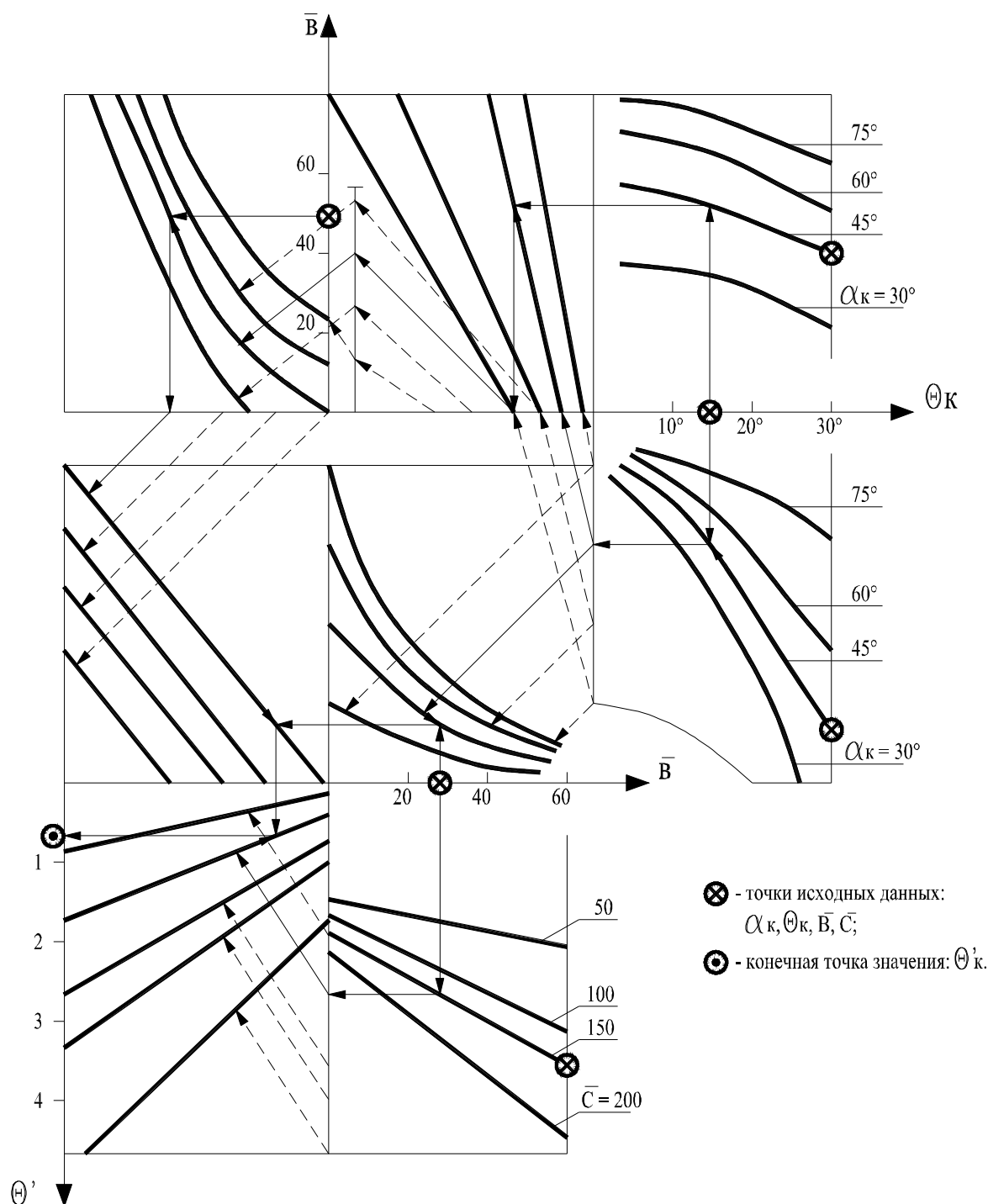


Рис. 4.61. Номограмма определения углов «ослабления»

Различие условий подкрепления оболочки вдоль координаты x_3 влияет и на характер выпучивания, который отличается от гипотетического, описываемого функцией $w(x_1, x_3)$, и представляет собой «горку» с вершиной, положение

которой можно определить с помощью формулы (3.114). В этой связи следует ожидать изменения радиуса зоны сгиба на участках, примыкающих к осевой плоскости, что было установлено экспериментально [201] без соответствующего объяснения этого эффекта. Отчасти данное небрежение объясняется слабым проявлением эффекта при профилировании заготовок с малой шириной полок и узким дном ($b/s_0 < 25$; $C/s_0 < 20$). Описанный эффект выпучивания дна профиля, являясь положительным с точки зрения разгрузки подгибаемой полки, оказывается отрицательным при изготовлении тонкостенных профилей значительных габаритных размеров сечения (один из размеров составляет более $1/3$ межклетьевого расстояния). В этом случае зона плавного перехода поглощает зону стабилизации $L_{ст}$ (межклетьевого расстояния недостаточно для свободного формообразования), в результате чего перед роликами текущего перехода образуется «хлопун», неравномерность осадки которого в роликах приводит к эффекту «прощелкивания». На готовом профиле донная часть в этом случае имеет периодические локальные выпучивания, различимые визуально. В случае равномерной осадки вблизи угловых зон могут наблюдаться мелкие поперечные или косые гофры (на профилях с цинковым покрытием можно видеть темные линии от неравномерного контактного взаимодействия заготовки с роликом, напоминающие линии Чернова-Людерса). С подобными проблемами приходится сталкиваться и при производстве гофрированных профилей. Так, в 1992 году при внедрении линии производства гофрированного листа $1250 \times 0,3$ мм с высотой гофр 15 мм на предприятии «САМЕКО» (металлургический комбинат, г. Самара) из-за малого межклетьевого расстояния станка возникали мелкие рифты у основания гофр. При равномерной осадке больших «горок» на донной части профиля могут оставаться чашеобразные хлопуны с относительно равномерным шагом, хорошо различимые в отраженном свете.

Угол поворота сечения φ_k представляет собой так называемый угол «ослабления» режима подгибки по сравнению с режимом подгибки полок при формообразовании профиля с абсолютно жестким дном. На рис. 4.61 приводится номограмма определения угла «ослабления» в зависимости от суммарного угла подгибки, угла подгибки в текущем переходе, относительной ширины полки и относительной ширины дна, построенная на основе разработанной теоретической модели с использованием пакета MathCAD-2001 Pro и экспериментальных данных. Процедура отыскания угла ослабления указана на рис. 4.61 линиями со стрелками. Исследование зависимости (1.112) по номограмме показывает, что угол ослабления при углах подгибки более 30 градусов, толщине заготовки 0,6 мм и ширине подгибаемой полки более 50 толщин заготовки может достигать 5 градусов. Разумеется, с увеличением толщины заготовки эффект «ослабления» будет убывать, если только он не будет компенсирован увеличением ширины донной части профиля и межклетьевого расстояния.

При разработке технологии эффект «ослабления» углов подгибки следует учитывать, назначая более жесткие режимы подгибки для профилей с широким дном. Суммарное дифференцированное (с учетом рис. 4.61) увеличение углов подгибки на всех переходах фактически приводит к уменьшению потребного

числа переходов на единицу, что позволяет уменьшить количество формирующих роликов и расширить технологические возможности применяемого оборудования в связи с появлением возможности освоения номенклатуры профилей, которая требовала бы большего числа клетей по сравнению с наличным в станках модели ГПС. Однако при этом необходимо следить, чтобы не происходила потеря устойчивости подгибаемых полок. В ряде случаев, как уже указывалось ранее, можно использовать технологические гофры / рифты или межклетьевые проводки [170] в качестве вынужденной меры. Для разработчика технологии важным является умение а priori определять потребное число переходов.

4.13. Эмпирические модели и расчеты числа переходов

4.13.1. Эмпирические модели

Для верификации модели числа переходов (см. п. 3.11) из журналов технологической отработки профилей производились выборки профилей, изготовленных без применения специальных способов. Количество представителей в выборках составляло 9, 12, 10 и 11 для уголкового, швеллерного, корытного и С-образного типов профилей соответственно.

Факторами являлись толщина заготовки S , ширина подгибаемой полки b , внутренний радиус зоны сгиба r_B , ширина дна C , ширина горизонтальной полки g , а зависимой случайной величиной (результативным признаком) – число переходов N .

Для каждого типа профилей строились частные регрессионные модели с помощью опции «Регрессия» из «Пакета анализа» прикладной программы Microsoft Excel-2000⁷. При построении моделей придерживались определенной последовательности [419]:

- 1) задание аналитической формы уравнения регрессии и определение параметров регрессии;
- 2) определение степени стохастической взаимосвязи результативного признака и факторов, проверка качества уравнения регрессии;
- 3) проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии.

Аналитическую форму уравнений регрессии задавали в аддитивной форме. При этом линейные размеры поперечного сечения профиля относили к толщине заготовки. Для каждой модели результаты расчета по пп. 1) – 3) выводились в виде отчетов регрессионной статистики, дисперсионного анализа и оценки значимости коэффициентов регрессии. Стандартными критериями значимости модели и коэффициентов в пакете являются критерии Фишера и t – распределение Стьюдента соответственно [419].

Получены следующие уравнения регрессии:

- 1) Угловой профиль

⁷ Эти работы выполнены д.т.н В.Н. Клячкиным

$$N = 0.872 \cdot s^{0.27} \cdot \left(\frac{b}{s}\right)^{0.364} \cdot \left(\frac{r_B}{s}\right)^{0.508}. \quad (4.12)$$

2) Швеллерный профиль

$$N = 1.734 + 0.0533 \cdot \frac{b}{s} + 1.25 \cdot \frac{r_B}{s} - 0.008 \cdot \frac{C}{s}. \quad (4.13)$$

3) Корытный профиль

$$N = 0.534 \cdot s^{0.482} \cdot \left(\frac{b}{s}\right)^{0.525} \cdot \left(\frac{g}{s}\right)^{0.145}. \quad (4.14)$$

4) С-образный профиль

$$N = 1.022 \cdot s^{0.313} \cdot \left(\frac{b}{s}\right)^{0.464} \cdot \left(\frac{r_B}{s}\right)^{0.336}. \quad (4.15)$$

Попытка построения гибридной модели для всех четырех типов профилей оказалась неудачной, что связано, по-видимому, с разнородностью исходных данных. Модели (4.12)–(4.15) значимы; факторы, не входящие в модели, но объявленные данному типу профиля, оказались незначимыми и были отброшены.

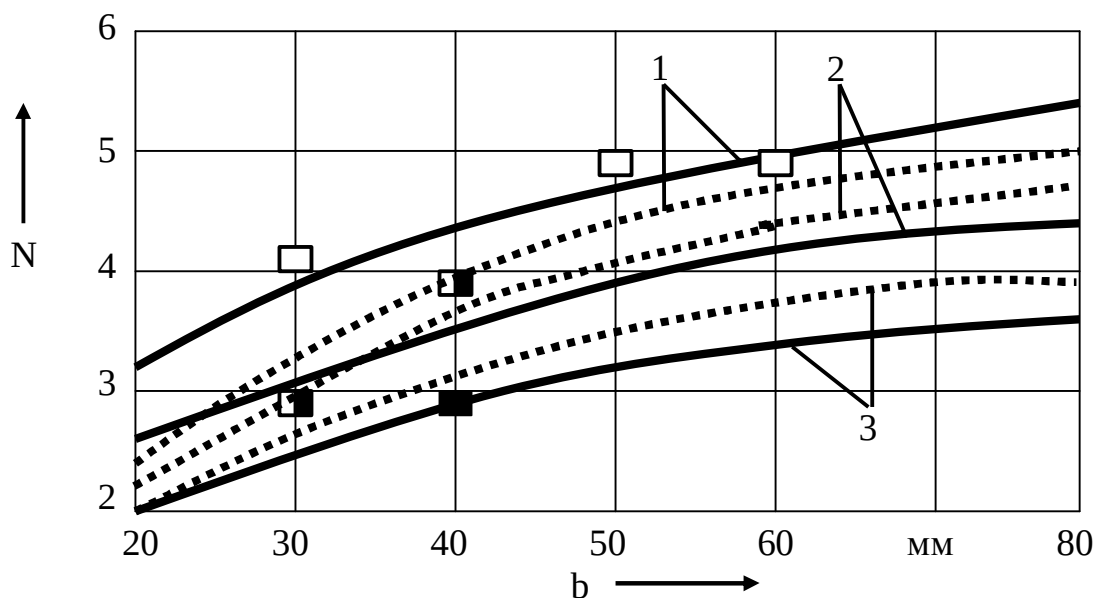


Рис. 4.62. Число переходов для углового профиля:

— — частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 □, ■, ■ — эксперимент при $s = 0,6; 1,0; 1,5$ мм соответственно для 1, 2, 3

Для сравнения эмпирических моделей с гибридной полуэмпирической моделью (3.134) и опытными данными на рис. (4.62) – (4.65) представлены полученные результаты. В качестве основного аргумента выбрана ширина полки – важнейший геометрический параметр сечения профиля, определяющий до

известной степени число переходов при профилировании. Тенденция изменения числа переходов с ростом ширины полки совпадает с моделью (3.134), причем, графики, относящиеся к уголкового и С-образному профилям имеют характер кривых насыщения, что также согласуется с гибридной моделью (3.134).

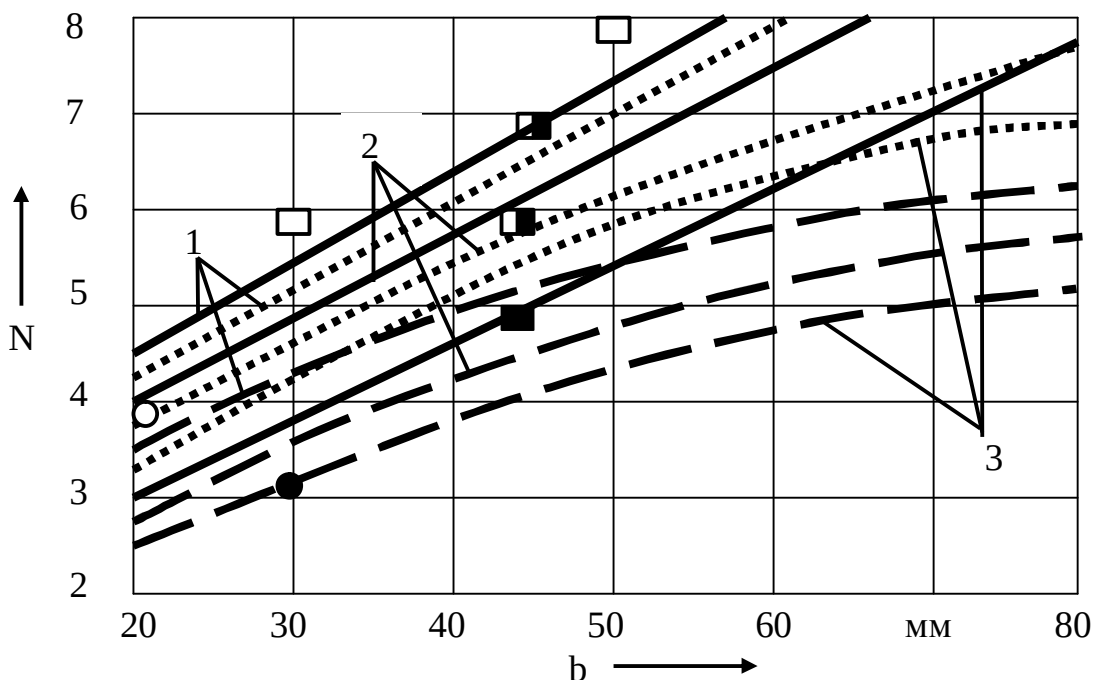


Рис. 4.63. Число переходов для швеллерного профиля:

— — — частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 □, ■, ■ — эксперимент при $C = 30; 100; 200$ мм ($s = 0,6$ мм) соответственно для 1, 2, 3; — — — полуэмпирическая модель при $C = 30; 100; 200$ мм ($s = 1,0$ мм) соответственно для 1, 2, 3; ○, ● — эксперимент при $s = 1,0$ мм для $C = 15; 30$ мм соответственно

Для корытного профиля отличие полуэмпирической модели от экспериментальной модели составляет порядка 20 % (рис. 4.64). Вероятнее всего, это можно отнести на счет «перестраховки» разработчиков оснастки и существовавшую традицию. Опыт работы автора показывает, что профили с указанными размерами могут быть изготовлены за 5 – 6 переходов.

Нормировку гибридной модели проводили при средних значениях диапазонов варьирования факторов на усредненное число переходов.

Следует указать на ограниченность данных по «чистым» схемам и режимам формообразования, в связи с чем, например, для того же рис. 4.64 уровень значимости для факторов был взят равным 0,08, что свидетельствует о несколько недостаточном уровне репрезентативности исходных данных. С этим недостатком связан и характер зависимости числа переходов от радиусагиба в частных экспериментальных моделях.

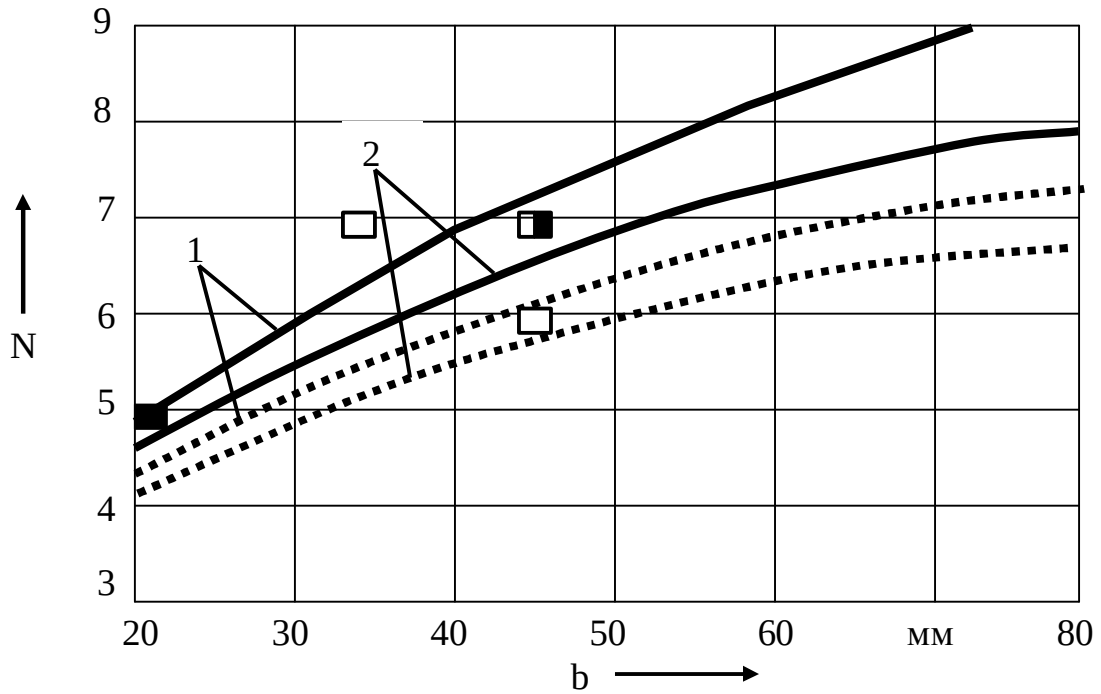


Рис. 4.64. Число переходов для корытного профиля:

— частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 □, ■ — эксперимент при $g = 10; 20$ мм ($s = 0,6$ мм) соответственно для 1;
 ■ — эксперимент при $g = 15$ мм ($s = 1,0$ мм) для 2;

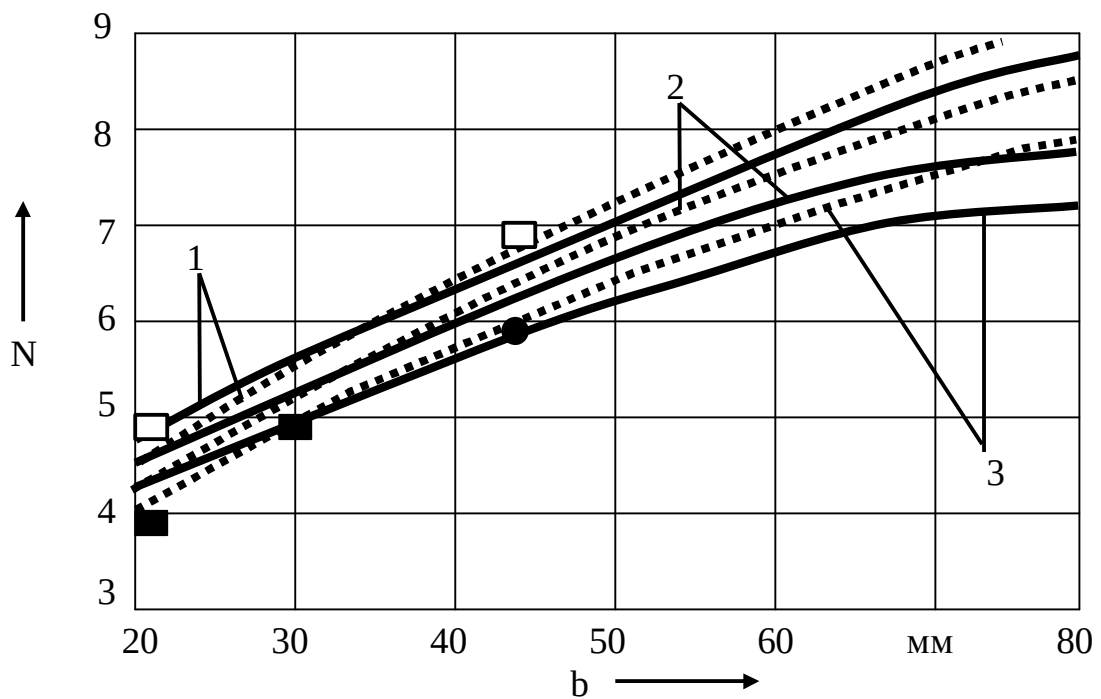


Рис. 4.65. Число переходов для С – образного профиля:

— частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 □, ●, ■ — эксперимент при $s = 0,6; 1,0; 1,5$ мм соответственно для 1, 2, 3

Небольшой срок использования гибридной модели в практике проектирования оснастки показал ее хорошие прогностические возможности. Надлежит отметить, что расчетное число переходов, полученное из гибридной модели (3.134), следует округлять в сторону превышения, если дробная часть величины числа переходов превосходит 0,3.

Заметим, что для технолога-разработчика, имеющего значительный опыт проектирования технологической оснастки, вопрос назначения числа переходов для типовых профилей определяется на основе предшествующего опыта.

В то же время для начинающих технологов приведенные результаты будут весьма полезны, в особенности для технологов промышленных предприятий. Ниже приведены примеры проведения расчетов для некоторых профилей.

4.13.2. Расчет числа переходов перфорированного уголка

На рис. 4.66 представлен профиль, подлежащий изготовлению [420]. На рис. 4.67, построенном с помощью пакета MathCad-2001Pro в соответствии с моделью (3.134), показана процедура определения потребного числа переходов, подлежащего округлению в сторону увеличения, что составляет пять переходов.

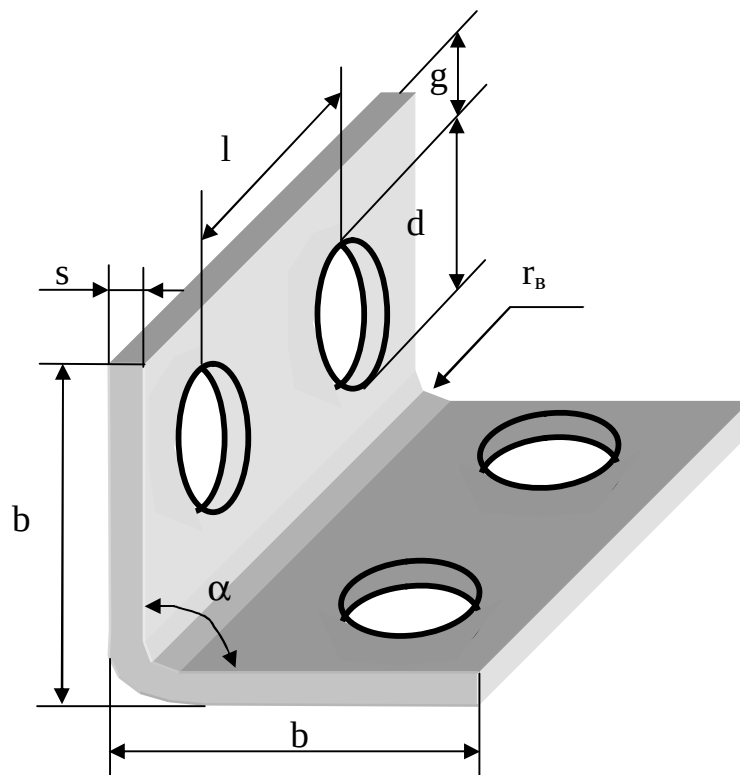


Рис. 4.66. Эскиз перфорированного уголка

Особенность технологии изготовления профиля заключалась в жестких допусках на размеры отверстий. В постановочном эксперименте формообразования была предпринята попытка изготовления профиля за четыре перехода, причем первые три были открытыми, в которых кривизна зоны сгиба составляла $4s$, а в последнем, закрытом, калибре с вертикальным замыканием достигалась заданная кривизна внутреннего контура зоны сгиба. При этом

происходило изменение размеров отверстий на (2 – 3) % с их преобразованием в эллиптическую форму и расположением большей оси под углом около 30° по отношению к продольной оси.

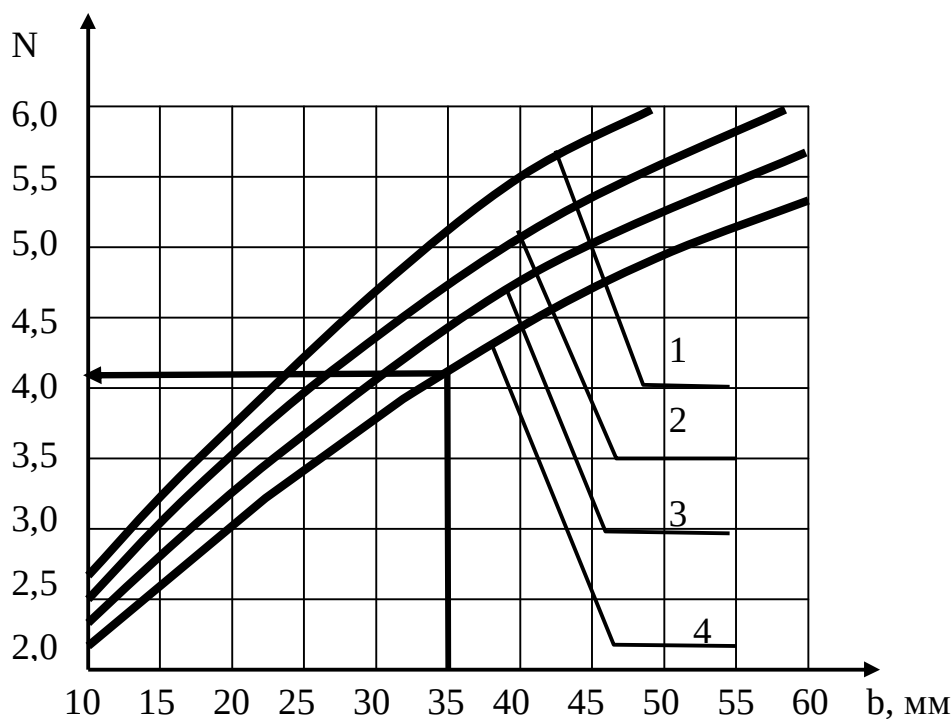


Рис. 4.67. График определения числа переходов для угловка: 1, 2, 3, 4 – $s = 0,7; 1,0; 1,3; 1,6$ мм соответственно

При изготовлении профиля за пять переходов в открытых калибрах отклонения по размерам диаметра отверстий превышали допустимые значения отклонений в 2 – 3 раза. Кроме того, присутствовала продольная кривизна профиля в пределах 4 – 6 мм/м. В этой связи была принята ориентация на технологию изготовления профиля за пять переходов в закрытых калибрах с целью обеспечения размерной точности отверстий и предотвращения поволоков профиля.

4.13.3. Расчет числа переходов профиля с элементами жесткости

На рис. 4.68 представлен полузакрытый профиль типа «стойка», применяемый в строительстве для декоративного обрамления ваннных комнат [421]. Профиль содержит элементы двойной толщины на периферийных участках и конструктивный рифт в донной части. Идентификация параметров исходного сечения профиля (см. рис. 4.68) представлена в табл. 4.21.

Таблица 4.21

Параметры исходного профиля

Параметр	Значение параметра, мм	Параметр	Значение параметра, мм
C	37	r_B	1,5 (на рис. 1 условно не показан)
b	7	s	0,5
g	12	a	3,7

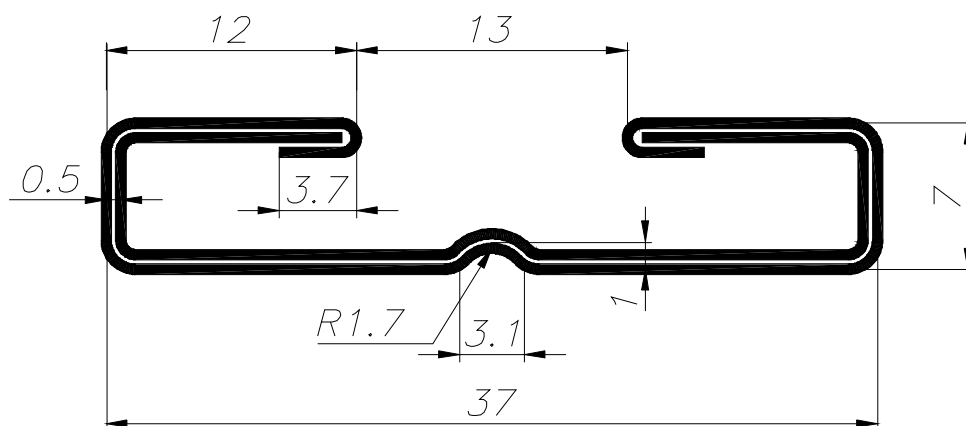


Рис. 4.68. Сечение изготавливаемого С-образного профиля

Формула определения числа переходов (3.134) разработана для профилей с гладкими полками, в связи с чем в расчетах, относящихся к профилю с элементами жесткости, введены следующие процедуры предварительного определения параметров и условий: 1) функцию формы определяли как для С-образного профиля с гладкими горизонтальными полками, уменьшенными на величину элемента двойной толщины; 2) ширину подгибаемого элемента брали равным номинальному значению суммарной ширины подгибаемых полок; 3) ввиду наличия рифта донную часть считали жесткой; 4) межклетьеовое расстояние принимали равным 400 мм – типовым для станков семейства ГПС.

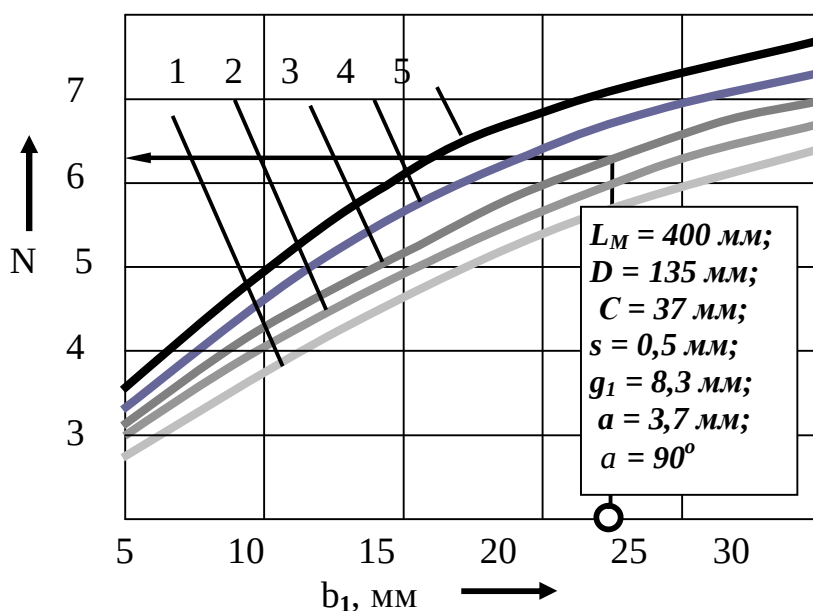


Рис. 4.69. Определение числа переходов:

1 – 5 – $g_B = 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0$ мм соответственно

Выбор числа переходов в зависимости от параметров табл. 4.21 производили по рис. 4.69, выполненному с помощью прикладной программы MathCAD2001Pro. В соответствии с пп. 1 и 2 условий, приведенных выше, в

расчетах были приняты модифицированные значения ширины горизонтальной и подгибаемой полок g_1 и b_1 соответственно.

По геометрическим параметрам профиля и числу переходов в качестве основного технологического оборудования был определен станок ГПС-300М6.

4.13.4. Число переходов при производстве бампера ВАЗ-2108

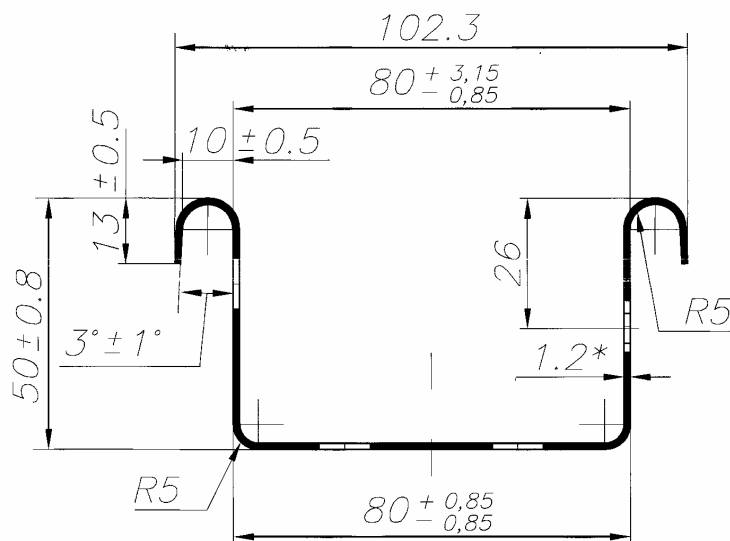


Рис. 4.70. Чертеж детали «бампер»

Заказчиком технологии и оборудования представлен чертеж профиля, приведенный на рис. 4.70, а также техническое задание на создание линии, основным требованием которого являлось выполнение пробивки крепежных отверстий и гибки по контуру в едином технологическом цикле при скорости профилирования не менее 4 м/мин [422].

Для выполнения расчетов числа переходов, введены следующие процедуры предварительного определения параметров

и условий: 1) функцию формы определяли как для корытного профиля с гладкими горизонтальными полками шириной, равной ширине их развертки; 2) число зон сгиба принимали равным четырем; 3) межклетьевое расстояние принимали равным 400 мм – типовым для станков семейства ГПС; 4) для учета на-

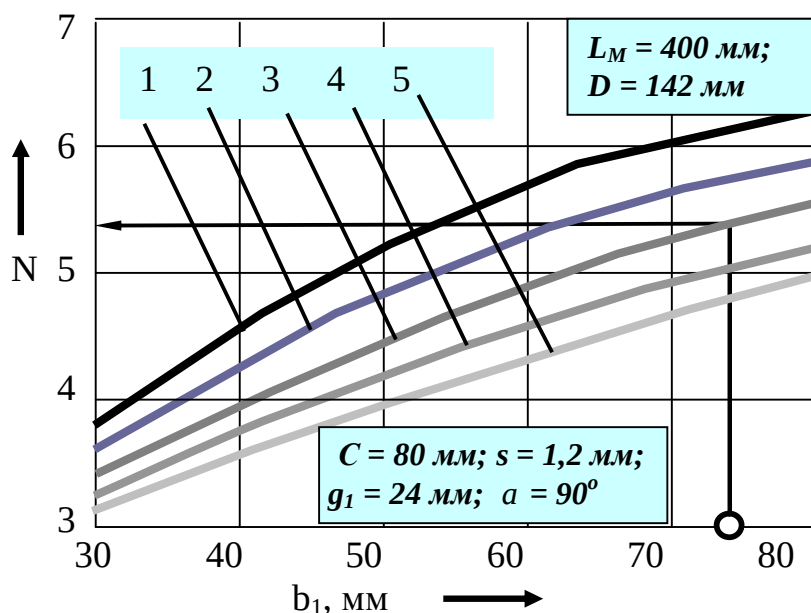


Рис. 4.71. Определение числа переходов:
1 – 5 – $r_B = 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0$ мм
соответственно

тяга кромки был введен фактор $\Psi = 1,056$ в правую часть формулы 3.134.

Выбор числа переходов в зависимости от параметров сечения профиля ($C = 80$ мм, $b = 50$ мм, $g_1 = 24$ мм, $b_1 = g_1 + b_1 = 74$ мм. $R = 12$ мм) производили по рис. 4.71, выполненному с помощью прикладной программы MathCAD2001Pro. В соответствии с п. 1 и 2 условий, приведенных выше, в расчетах были приняты модифицированные значения ширины горизонтальной и подгибаемой полок g_1 и b_1 соответственно.

Окончательно число переходов с учетом полученного из рис. 4.71 значения 5,26 определяется формулой, в которой функция Integer выделяет целую часть числа:

$$N = \text{Integer}(5,26) + 1 = 6.$$

Все расчеты данного пункта работы относились к МИД, где во избежание увеличения числа переходов часто применяют аксиальное растяжение (механическая схема 1, см. п.2.4). При СИ данный прием также применяется [258], однако в ряде случаев возможно приложение аксиального сжатия для снижения уровня остаточных напряжений и достижения значительных утолщений в угловой зоне.

4.14. Аксиальное поджатие при использовании СИ

4.14.1. Предварительные переходы [343]

Схема с аксиальным сжатием (механическая схема 3, рис. 2.5 в п. 2.4), может быть реализована за счёт различных окружных скоростей роликов на предварительном и окончательном переходах (рис. 4.72). Данный процесс требует достаточно точной настройки как по скорости вращения роликов, так и по регулированию зазора в последних. Кроме того, необходимо обеспечить стабильность величины аксиального сжатия, что будет гарантировать тождественность условий формообразования профиля по его длине. Следует отметить, что в случае достижения больших деформаций на окончательном переходе при изготовлении длинномерных тонкостенных профилей происходит потеря устойчивости заготовки из-за чрезмерных аксиальных нагрузок, приводящая к заклиниванию роликов, после чего необходимо снова производить их настройку. Это приводит к простоям и неоправданным затратам металла.

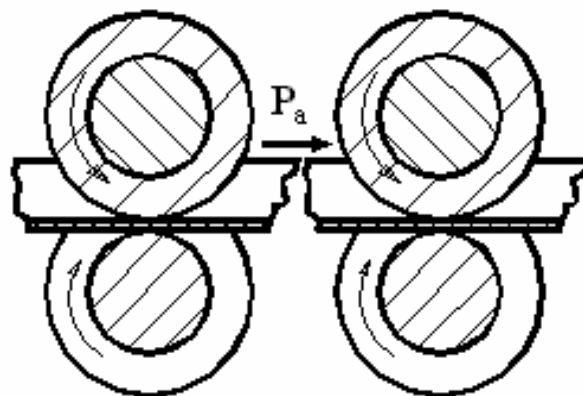


Рис. 4.72. Создание аксиального подпора в роликах станка

Данный недостаток процесса можно преодолеть, если согласовать величину допустимого аксиального сжатия с величиной зазора в паре роликов предварительного перехода с тем, чтобы при достижении определённой величины аксиального сжатия происходило проскальзывание роликов по поверхности за-

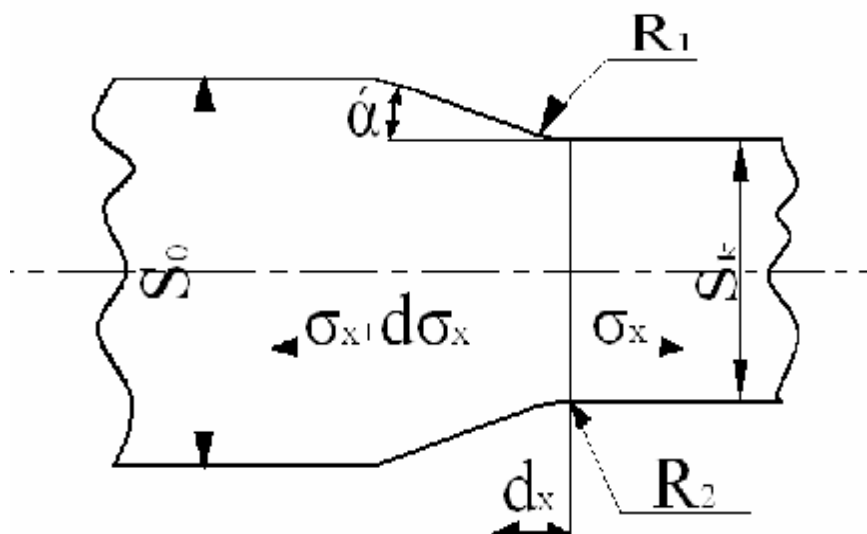


Рис. 4.73. Разложение сил, действующих на элемент заготовки, сжатой роликами предварительного перехода

готовки, а не потеря устойчивости последней. Условия достижения критических значений аксиальных нагрузок $P_a^{кр}$ и необходимые формулы для их расчёта приведены в работе [423].

Рассмотрим механизм взаимодействия аксиального сжатия и двустороннего сжатия профиля ролика на предварительном переходе. Для выделенного элемента профиля (рис. 4.73) уравнение равновесия после преобразования и линеаризации имеет вид:

$$\frac{dP(1 - \frac{S_0 - S_k}{4R})}{s_s + P(\frac{S_0 - S_k}{4R}) + Pf\sqrt{\frac{2R}{S_0 - S_k}}} = \frac{dx}{\sqrt{\frac{2S_0^2 R}{S_0 - S_k}}}, \quad (4.16)$$

где P – нормальное давление со стороны роликов; S_0 – толщина исходной заготовки; S_k – величина зазора в роликах; σ_s – предел текучести материала; f – коэффициент трения скольжения.

Здесь приведённое значение радиуса R вычисляется по формуле:

$$R = \frac{2 R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

где R_1 и R_2 – радиусы верхнего и нижнего роликов соответственно.

Интегрирование уравнения (4.16) даёт:

$$\left[s_s + Pf\sqrt{\frac{2R}{S_0 - S_k}} \right]^{f^* \sqrt{\frac{2r}{S_0 - S_k}}} = C \left(x + \sqrt{\frac{2RS_0^2}{S_0 - S_k}} \right), \quad (4.17)$$

где C – постоянная интегрирования.

Граничные условия для входного сечения будут нулевыми, а для выходного сечения должно выполняться соотношение: $\sigma_x + \sigma_a = 0$.

Принимая во внимание граничные условия, из формулы (4.17) получаем нормальное давление P_1 во входной зоне:

$$(s_s + P_1 fl)^{fl} = \frac{l^2}{R\sqrt{2 + l^2}} * [s_s(1 + \frac{fl}{1 - \frac{1}{2l^2}})]^{fl} (x + S_0 l). \quad (4.18)$$

Здесь принято следующее обозначение $l = \sqrt{\frac{2R}{S_0 - S_k}}$.

Для выходной зоны знак коэффициента трения скольжения меняется на противоположный и, определив постоянную интегрирования из граничного условия, получаем распределение нормального давления P_2 в выходной зоне:

$$(s_s + P_2 fl)^{-fl} = (s_s - \frac{s_s + s_a}{1 - \frac{1}{2l^2}} fl)^{-fl} (\frac{x + S_0 l}{S_0 l}). \quad (4.19)$$

Суммарное нормальное усилие P_N , действующее на заготовку со стороны ролика, определяется соотношением:

$$P_n = B \int_0^{X_H} P_2(x) dx + B \int_{X_H}^{X_B} P_1(x) dx, \quad (4.20)$$

где B – ширина заготовки; X_B – протяженность зоны контакта заготовки и роликов, равная $\frac{R\sqrt{2}}{l}$; X_H – координата нейтрального сечения, которая определяется из условия согласования значений $P_1(x)$ и $P_2(x)$ для входной и выходной зон с использованием формул (4.18) и (4.19) соответственно.

Отметим одно обстоятельство, позволяющее избежать решения трансцендентного уравнения для определения X_H и делающее излишним нахождение второго интеграла в выражении (4.20). Дело в том, что при наличии аксиального сжатия нейтральное сечение при условиях, близких к условиям проскальзывания, смещается в сторону входного сечения и выполняется условие $X_H \approx X_B$.

В этом случае после проведения интегрирования в выражении (4.20) нормальное усилие выразится в виде:

$$P_N = \frac{B}{fl} \{ s_s X_B - (s_s - \frac{s_s + s_a}{1 - \frac{1}{2l^2}}) \frac{S_0 l}{fl + 1} [(\frac{X_B}{S_0 l} + 1)^{fl+1} - 1] \}. \quad (4.21)$$

Исходя из того, что $\frac{X_B}{R} = \frac{\sqrt{2}}{l} < 0.03$, с точностью, достаточной для нашего рассмотрения, можно определить аксиальное усилие P_a' следующим образом:

$$P_a' = 2 f \cdot P_N. \quad (4.22)$$

Тогда интегральное условие проскальзывания профиля принимает вид:

$$P'_a = s'_a S_0 B. \quad (4.23)$$

Используя выражения (4.21) и (4.22), из формулы (4.23) получим уравнение, позволяющее определять величину необходимого зазора в паре роликов предварительного формообразования для обеспечения требуемого аксиального усилия:

$$\frac{s_s R \sqrt{2}}{l} + \frac{s'_a S_0 l}{f l + 1} \left[\left(\frac{R \sqrt{2}}{l^2 S_0} - 1 \right)^{f l + 1} - 1 \right] = \frac{s'_a S_0 l}{2}. \quad (4.24)$$

В соотношении (4.24) принято во внимание то обстоятельство, что $\lambda \gg 1$.

Исходя из формулы (4.24), на рис. 4.74 построена номограмма, дающая возможность определять величину аксиального давления в зависимости от величины зазора в роликах. При построении номограммы были использованы новые переменные t , δ и k , определяемые следующим образом:

$$t = f \lambda + 1, \quad \delta = S_0 - S_k, \quad k = \frac{R \sqrt{2}}{S_0 l} = \frac{d}{S_0 \sqrt{2}}.$$

Заметим, что при $S_0 > S_k$ связь величины зазора в роликах с величиной аксиального сжатия не зависит от ширины заготовки и конфигурации сечения перехода. Однако эти два фактора играют существенную роль в двух случаях: 1) когда зазор в роликах предварительного перехода превосходит толщину заготовки и 2) когда рассматривается разложение сил в сечении с координатой, близкой к X_B . В том и другом случае надлежит рассмотреть задачу о радиальных нагрузках, действующих на заготовку со стороны роликов (рис. 4.75).

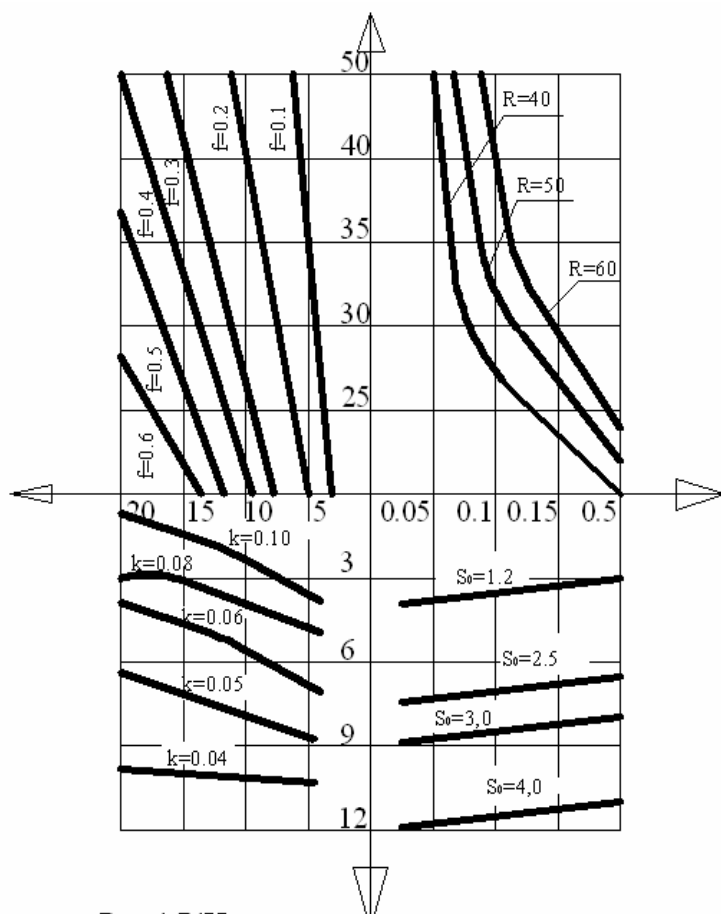


Рис. 4.74 Номограмма для определения настроечных параметров процессов гибки

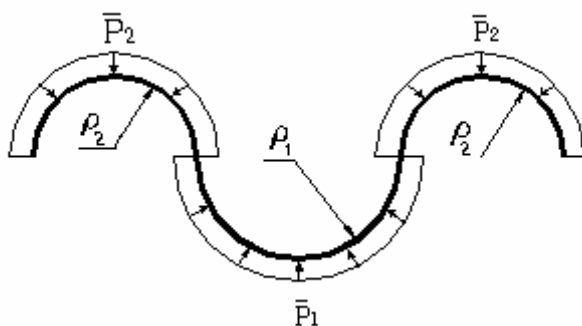


Рис. 4.75. Схема обжима заготовки на предварительном переходе

Представив заготовку в виде сопряженных оболочек и следуя работам [290, 424], из уравнений, описывающих поведение осесимметричных оболочек, получим выражение для нормального давления на заготовку со стороны роликов (рис. 4.75) в следующем виде:

$$\tilde{P}_i = - \left\{ \frac{1}{g_i} - \left[\frac{1+g_i}{g_i} \right] \left(\frac{r_i}{r_i + S_0} \right)^{g_i} \right\} \frac{S_0 \cos b_i}{r_i} \frac{2}{\sqrt{3}} s_s, \quad (4.25)$$

где $\tilde{P}_i$ - нормальное давление на i -ом участке заготовки (i принимает значения 1 и 2); b_i - угол наклона элементарного участка обжатой зоны по отношению к продольной оси; r_i - радиус кривизны заготовки в трансверсальном сечении на i -ом участке заготовки.

Здесь $g_i = \frac{f}{\operatorname{tg} b_i} = f \sqrt{\frac{2 r_i}{S_0}}$.

Определим теперь суммарное усилие P_{Ni} , действующая на единицу длины заготовки:

$$P_{Ni} = \int_{r_i}^{r_i + S_0} \tilde{P}_i \frac{d\tau}{\sin b_i}, \quad (4.26)$$

где τ - переменная интегрирования.

Из выражений (4.25) и (4.26), после интегрирования с точностью до одного процента имеем:

$$P_{Ni} = S_0 \operatorname{ctg} b_i \left\{ \ln \frac{r_i + S_0}{r_i} - \frac{(1+g_i) S_0^2}{r_i^2} \right\} \frac{2}{\sqrt{3}} s_s. \quad (4.27)$$

Аксиальное усилие определяется следующим образом:

$$P_a = (P_{N1} r_1 + 2 P_{N2} r_2) f p. \quad (4.28)$$

Заметим, что при выборе схемы формообразование следует учитывать связь r_1 и r_2 (рис. 4.75) через ширину заготовки:

$$r_1 + 2 r_2 = \frac{B}{p}$$

Используя соотношение (4.28) и аналог выражения (4.23) $P_a'' = s_a'' S_0 B$, получим условие проскальзывания в случае, когда $S_0 < S_k$:

$$r_1^{3/2} \ln \frac{r_1 + S_0}{r_1} + 2 r_2^{3/2} \ln \frac{r_2 + S_0}{r_2} - (1+g_i) S_0^2 \left(\frac{1}{\sqrt{r_1}} + \frac{2}{\sqrt{r_2}} \right) = \frac{B}{fp} \sqrt{\frac{3 S_0}{8}} \frac{s_a''}{s_s}. \quad (4.29)$$

Таким образом, из уравнения (4.29) видно, что условия проскальзывания зависят как от схемы формообразования, так и от ширины исходной заготовки. Заметим, что в данном случае величина зазора между роликами несущественна, поскольку усилие обжима определяется кривизной поверхности заготовки.

Итак, уравнения (4.24) и (4.29) полностью определяют условия проскальзывания. При зазоре в роликах, превосходящих толщину заготовки, следует использовать формулу (4.29), а при зазоре, меньшем толщины заготовки, надлежит применять формулу (4.24). Кроме того, формула (4.29) дает нижнюю гра-

ницу аксиального давления S'_a , определяемого выражением (4.24), из которого, в частности, следует, что для зазора, равного толщине заготовки, т.е. $S_0 = S_k$, проскальзывание наступает при $S'_a = 0$, хотя в действительности проскальзывание имеет место лишь при достижении значения аксиального давления S''_a , определяемом из соотношения (4.29).

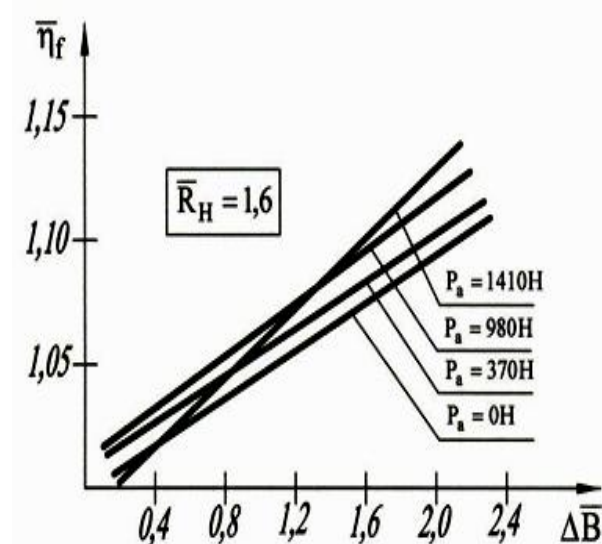


Рис. 4.76. Зависимость утолщения зоны сгиба от аксиального сжатия

Для изучения влияния заданного подпора согласно схеме рис. 2.5 на характеристики профиля исследовали формообразование швеллерного профиля 14x23x1,2 мм из материала 1420 и Д16чТ согласно процедуре, описанной в п. 4.3 настоящей главы [423]. Здесь брали вариант посадки наружного контура, причем, относительный радиус инструмента был равен 1,6, что обусловлено условиями приближения значений параметров эксперимента к их практическим параметрам. Данный вариант выбран еще и с той целью, что здесь имеется возможность изменения внутреннего ра-

диуса в отличие от варианта с двусторонним обжатием зоны сгиба. Отметим, что величины аксиальных поджатий определяли расчетом по формуле (4.28), а подпор обеспечивали уменьшением диаметра ролика последнего перехода по сравнению с предыдущим в пределах 1%. При различии диаметров более 0,8 % и обжиге более $0,1S_0$ в предпоследней паре роликов наблюдалась потеря устойчивости заготовки в виде излома. При небольшом обжиге (порядка 0,05 мм) на поверхности профиля наблюдали периодические потертости на поверхности профиля. До величины 0,4 % в перепаде диаметров роликов предпоследнего и последнего переходов, вероятно, происходит релаксация материала, находящегося в пластическом состоянии, а при больших значениях перепада возможно «набегание» материала и потеря устойчивости профиля. На рис. 4.76 представлены графические зависимости утолщений зоны сгиба от ширины заготовки для различных величин аксиального поджатия после обработки результатов методом наименьших квадратов. При погрешности коэффициентов не более 7% из рис. 4.76 следует, что утолщение не превышает 5 %, а в диапазоне практических значений параметров — 2 — 3 %. Значения внутреннего относительного радиуса изменений практически не испытывают. Однако происходит снижение до 12 МПа остаточных напряжений на стенке и на полках (в отсутствие аксиального поджатия остаточные напряжения могут достигать значений порядка $0,7 \sigma_T$), что показано с помощью рентгеноструктурного анализа полок.

Заметим, что в несколько более ранних исследованиях [33] данный вопрос изучен экспериментально более основательно: проведены экспериментальные исследования с удержанием специальным устройством заднего конца профиля и измерением сил проскальзывания в каждом из переходов для швеллерного, корытообразного с отбортовками и зетового профиля из алюминиевых сплавов 1163 и 1420 при номинальном избытке заготовки $0,4S_0n$ (n – число зон сгиба). Показано хорошее соответствие полученных результатов с данными номограммы 4.74. Однако усилия, полученные в отсутствие поперечного обжатия, отличаются от теоретических данных более, чем на 30 %. При избытке ширины заготовки, превышающей на 50 % номинальные значения, указанное расхождение уменьшается почти в три раза. Установлено, что механические характеристики заготовки слабо влияют на условия проскальзывания: по параметру σ_T/σ_a расхождение данных для материалов, отличающихся по σ_T более, чем на 30 % составляет всего (6...8) %.

4.14.2. Переход окончательного формообразования [343]

Для создания переднего подпора использовали схему, изображенную на рис. 4.77. В качестве элемента, создающего аксиальное усилие, применяли специальное устройство станка ГПС–200М1 с удлиненной фильерой (длиной 200 мм) и специальным дополнительным устройством замыкания, позволяющим осуществлять регулировку величины усилия поджатия. Предварительные исследования проводили при отключенных роликах предварительных переходов (раздвигались валы). Постановочные эксперименты показали, что при увеличенном зазоре в роликах окончательного Формообразования швеллерный профиль 14x23x1,2 из материала 1420 останавливался при усилиях от 2,6 до 4,3 кН. При включенных клетях предварительного формообразования с созданием сил сжатия порядка 7,0 – 7,5 кН при номинальной ширине заготовки происходило разрушение профиля в очаге деформации.

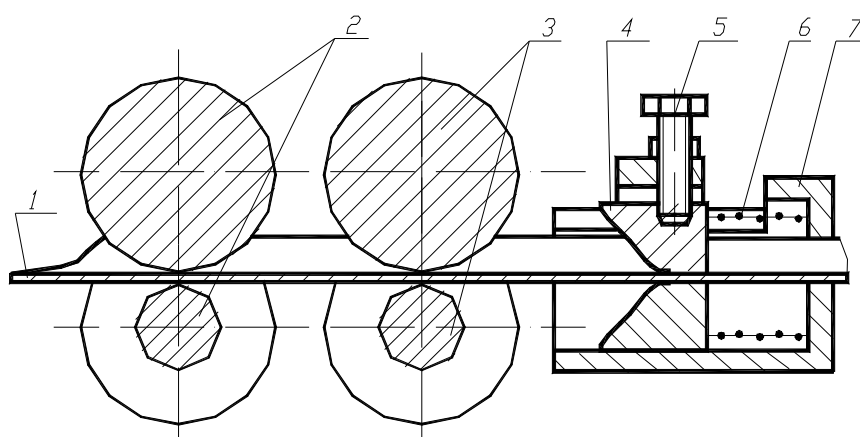


Рис. 4.77. Схема реализации переднего подпора: 1- заготовка; 2,3 – формующие ролики двух последних переходов; 4 – фильера; 5 – нажимной винт; 6 – тарированная пружина; 7 – корпус устройства

Эксперименты по исследованию влияния переднего подпора проведены при действующих клетях предварительных переходов. Изучали формообразование швеллерного и зетобразного (25x25x1,8 мм) с отбортовками профилей, для которых относительные радиусы наружного контура инструмента в уголкового зоне составляли 1,6 и 2,5 соответственно.

На рис. 4.6 и 4.7 представлены графики зависимости утолщения от величины переднего подпора ($\Delta B = k\eta$) для выбранных типов профилей, откуда видно, что приложение аксиального усилия позволяет существенно увеличить толщину зоны сгиба. На рис. 4.7 рост утолщения с увеличением усилия переднего подпора несколько меньше, чем на рис. 4.6, что объясняется различием наружных контуров зон сгиба и увеличением сопротивления пластической деформации при меньшей кривизне наружного контура. С ростом утолщения внутренний относительный радиус также несколько увеличивается: значение его может быть вычислено по формуле [33]: $\bar{r}_b = \bar{R}_n - 1 - h_f \cos \alpha / 1 - \cos \alpha$. При наличии аксиального поджатия обеспечивается прямолинейность профиля, а также снижаются значения остаточных напряжений на 40–80 %.

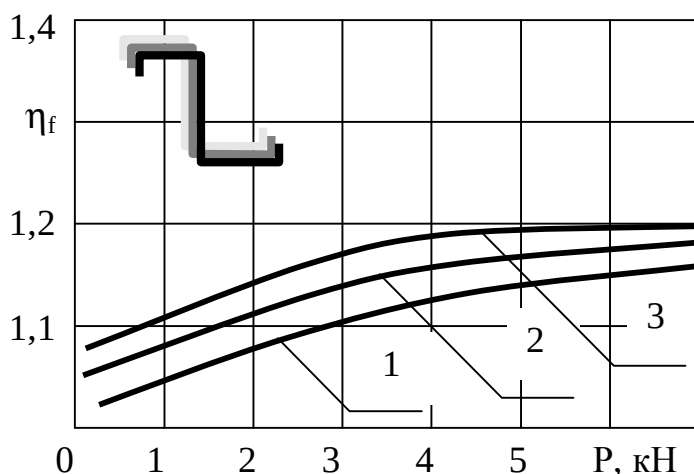


Рис. 4.78. Зависимость утолщения от переднего подпора: 1, 2, 3 — относительный избыток ширины заготовки: 0,8; 2,0; 3,2 соответственно

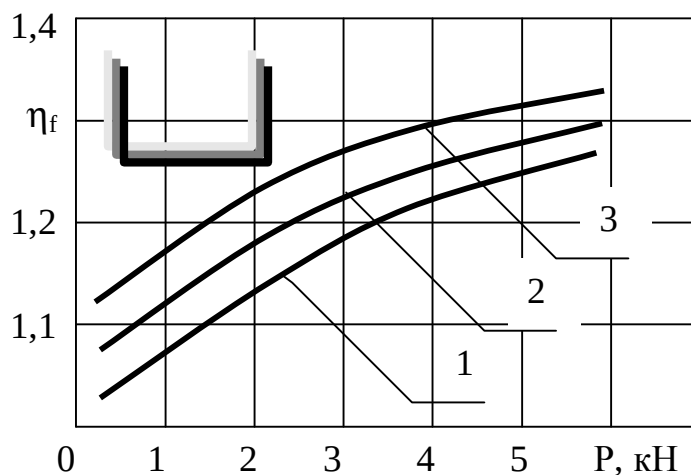


Рис. 4.78. Зависимость утолщения от переднего подпора: 1, 2, 3 — относительный избыток ширины заготовки: 0,4; 1,2; 2,0 соответственно

Однако приложение переднего подпора имеет и ряд недостатков: а) неравномерность утолщений по углам у концевых частей профиля, изготавливаемого из листа; б) в некоторых случаях разрушение профиля при плохом попадании в фильеру; в) большие усилия выдергивания профиля из фильеры; г) при больших величинах усилий подпора у профилей из плакированных материалов на поверхности остается блестящий след; нагрев и преждевременный износ фильер.

Для извлечения профиля из фильеры в станке ГПС-200М11 было предусмотрено

специальное устройство извлечения профиля, устанавливаемое за правильным устройством.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что применение данного варианта технологии наиболее целесообразно в случае: а) особых требований к утолщению в зоне сгиба; б) применения рулонного материала без покрытия.

Отметим также, что предельные значения усилий, соответствующие потери устойчивости профиля, не достигаются в процессе формообразования: раньше происходит разрушение профиля в калибре.

Таким образом, требуемое аксиальное сжатие в зависимости от технологических условий изготовления можно обеспечить либо путем выбора схемы формообразования при данной ширине заготовки, либо регулированием зазора в роликах. Для типовых профилей фактически возможно лишь второе, поскольку схемы формообразования определены и апробированы.

4.15. Определение силовых параметров процесса

При проектировании оборудования и оснастки необходимо знать энерго-силовые характеристики процесса. Процесс деформирования рассматривается состоящим из предварительного формообразования и окончательного (собственно стесненный изгиб), причем силовые характеристики определяются на основе вычисления работы формообразования каждого из элементов профиля с использованием свойств аддитивности работы [425]. Рассматривается обобщенная конфигурация (рис.3.47).

При формообразовании горизонтальных полок шириной b_3 на предварительных переходах заготовка имеет форму линейчатой поверхности (3.154), а потому, применяя метод верхней оценки, после интегрирования работу формообразования можно представить в виде [425]:

$$A_1 = \frac{S_0 B k_1}{n+2} \left(\frac{\alpha}{\bar{L} S_0} \right)^{n+1} b_3^{2+n}, \quad (4.30)$$

где B – длина профиля; $k_{1,n}$ – коэффициенты аппроксимации «единой кривой»; $\bar{L}$ – длина зоны деформирования, определяемая формулой (3.56).

Для боковых полок работа A_2 вычисляется аналогично:

$$A_2 = \frac{S_0 B k_1}{n+2} \left(\frac{\alpha}{\bar{L} S_0} \right)^{n+1} b_2^{2+n}, \quad (4.31)$$

где b_2 – ширина боковой полки профиля.

Работа формообразования уголка с учетом преобразования формулы (3.28) к логарифмической деформации и использования формулы (3.30) после интегрирования удельной работы представляется следующим образом:

$$A_3 = 2B \cdot k_1 \cdot S_0 \cdot m \int_0^{h_l} \left(\ln \frac{l+u}{l} \right)^{n+1} du, \quad (4.32)$$

где m – число зон сгиба профиля.

Работа осадки стенки A_4 (рис. 3.48) дается формулой:

$$A_4 = 2Bk_1R_1 \int_0^{b_1/2} \arccos \sqrt{\frac{R_1^2 - x^2}{R_p^2}} dx, \quad (4.33)$$

где R_p, R_1 – радиусы ролика и заготовки соответственно; b_1 – ширина стенки; x – переменная интегрирования.

Работа упругого обжатия заготовки A_5 в клети окончательного формообразования находится, исходя из работы [343]:

$$A_5 = \frac{B(S_0 - S_k)}{S_0} \frac{\sigma_T}{f\lambda} \left[\sqrt{2R_1(S_0 - S_k)}(1 + f\lambda) - 2X_n \right] (2b_3 + b_1 + 2b_2 \cos \alpha), \quad (4.34)$$

где S_k – зазор в калибре; f – коэффициент трения.

Здесь λ определяется таким же выражением, что и в формуле (4.18), а величина X_n находится из трансцендентного уравнения:

$$\frac{2}{1 - f\lambda} = \left[\frac{\bar{X}_n + \lambda}{\lambda} \right]^{\frac{1}{f\lambda}} + \left[\frac{\bar{X}_n + \lambda}{\sqrt{2R_1(S_0 - S_k)} + \lambda} \right]^{-\frac{1}{f\lambda}}. \quad (4.35)$$

Тогда суммарный крутящий момент определяется формулой [425]:

$$M \approx \frac{R_1}{B} \sum_{i=1}^5 A_i, \quad (4.36)$$

где A_i определяется соответственно одной из формул (4.30) – (4.34).

Распирающее усилие в роликах окончательного формообразования с учетом порядка входящих составляющих определяется формулой [425]:

$$P_N = \frac{\sigma_T}{f\lambda} \left[\sqrt{2R_1(S_0 - S_k)}(1 + f\lambda) - 2\bar{X}_n S_0 \right] (b_1 + 2b_2 \cos \alpha + 2b_3), \quad (4.37)$$

где X_n определяется формулой (4.35).

В работе [343] по формулам (4.36) и (4.37) построены номограммы для удобства использования в работе.

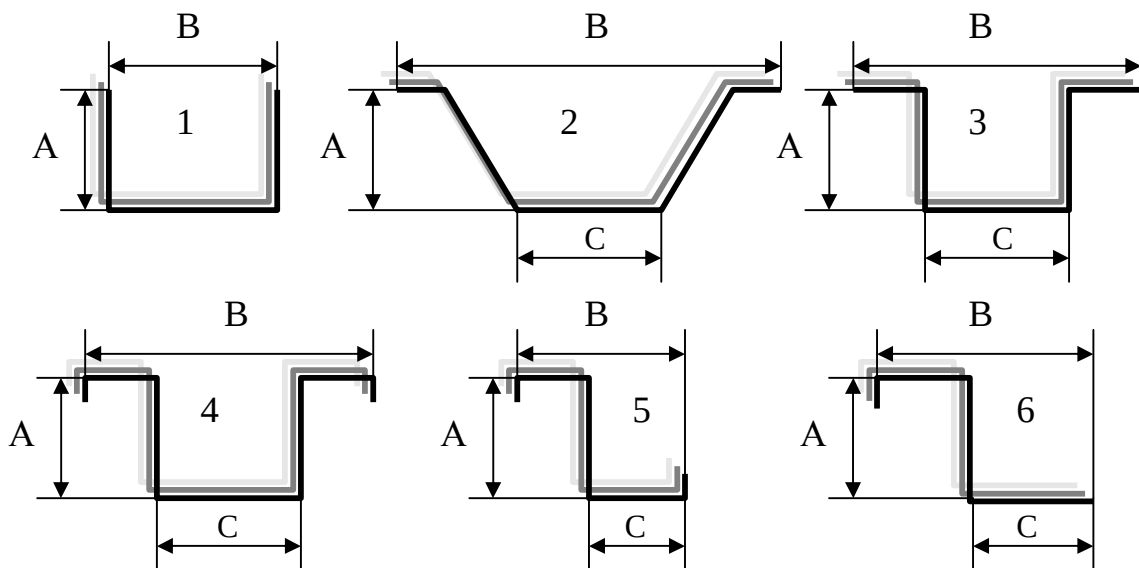


Рис. 4.79. Поперечные сечения исследуемых профилей

С целью получения фактических данных об энергосиловых параметрах стесненного изгиба исследовали зависимости распирающего усилия, крутящего момента на валах, токовой нагрузки электродвигателя и составляющих усилий правки для типовых профилей (рис. 4.79, табл. 4.22) из материалов Д16 (Д16М и Д16Т), В95, 1420 (1420ТГ) толщиной от 0,8 до 2 мм. Такие факторы, как смазка, шероховатость инструмента, скорость профилирования были исключены из числа варьируемых, так как их влияние изучено достаточно полно в работах других авторов [81, 27]. Основным объектом исследования был только окончательный переход, поскольку, как показали постановочные эксперименты, значения энергосиловых параметров на предварительных переходах составляет не более 3 — 5% от энергосиловых параметров на окончательном переходе. Исследования проводили на опытном станке ЭГПС–350, имеющем широкий диапазон регулировок и оснащенном необходимым комплектом технологического инструмента и аппаратуры для измерения силовых параметров (рис.4.80).

Таблица 4.22

Соответствие геометрических параметров размерным величинам

Параметр	Номер профиля согласно рис. 4.79					
	1	2	3	4	5	6
А, мм	14	16	25	30	20	25
В, мм	23	40	52	54	34	25
С, мм	—	10	32	24	18	15
С*, мм	1,2	1,2	1,5	1,2	1,0	2,5

* – толщина стенки профиля

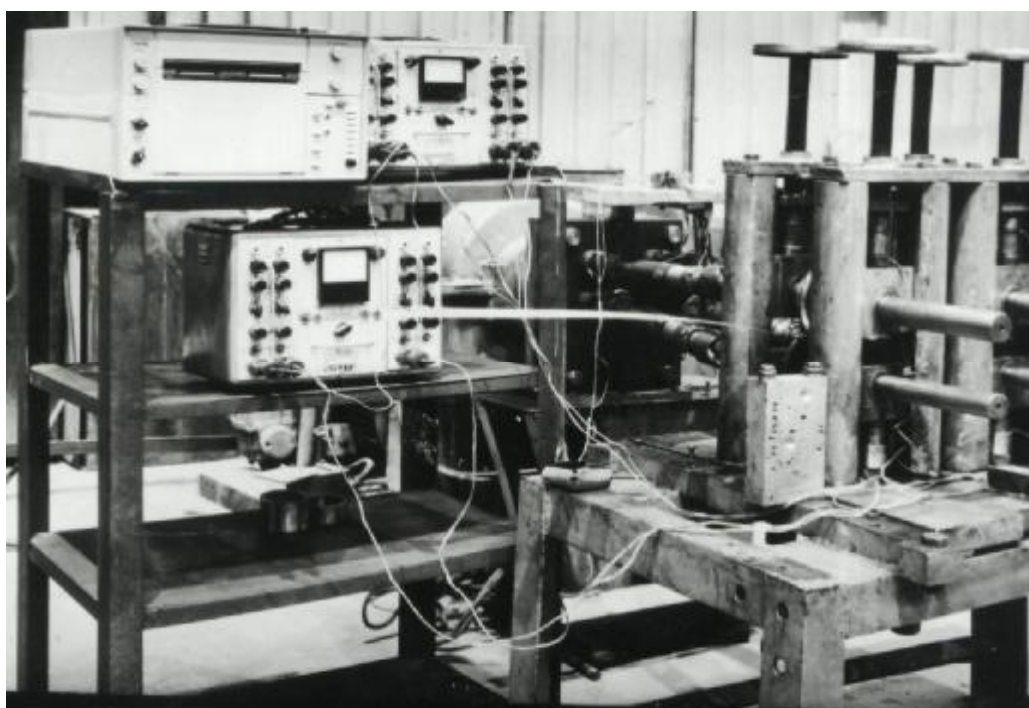


Рис. 4.80. Установка для исследования силовых параметров

Использовали электротензометрический метод измерения с ультрафиолетовой регистрацией сигналов на фотобумаге. Аппаратурой для измерений были усилитель тензометрический на несущей частоте УТЧ–1 и светолучевой осциллограф НЕВА–МТ1.

Датчиками измерения усилия профилирования служили полые цилиндрические месдозы с наклеенными на них и собранными в полумостовые схемы проволочными тензорезисторами типа 2ПКБ–10–100 (рис. 4.81, а, б, в). Датчики размещались под нажимными винтами всех клеток станка. Передача усилий от нажимных винтов осуществлялась через шаровую пяту для устранения внецентрового нагружения.

Крутящие моменты измеряли также при помощи тензорезисторов, наклеенных на каждый из шпинделей, передающих вращение от привода к верхнему и нижнему рабочим валам, под углом 45^0 к оси вала попарно на диаметрально-противоположных поверхностях. Для включения тензорезисторов, расположенных на вращающихся валах, во внешнюю измерительную цепь применяли токосъемные устройства щеточного типа (с подпружиненными лапелями). Конструкция устройства и схема сборки тензорезисторов для измере-

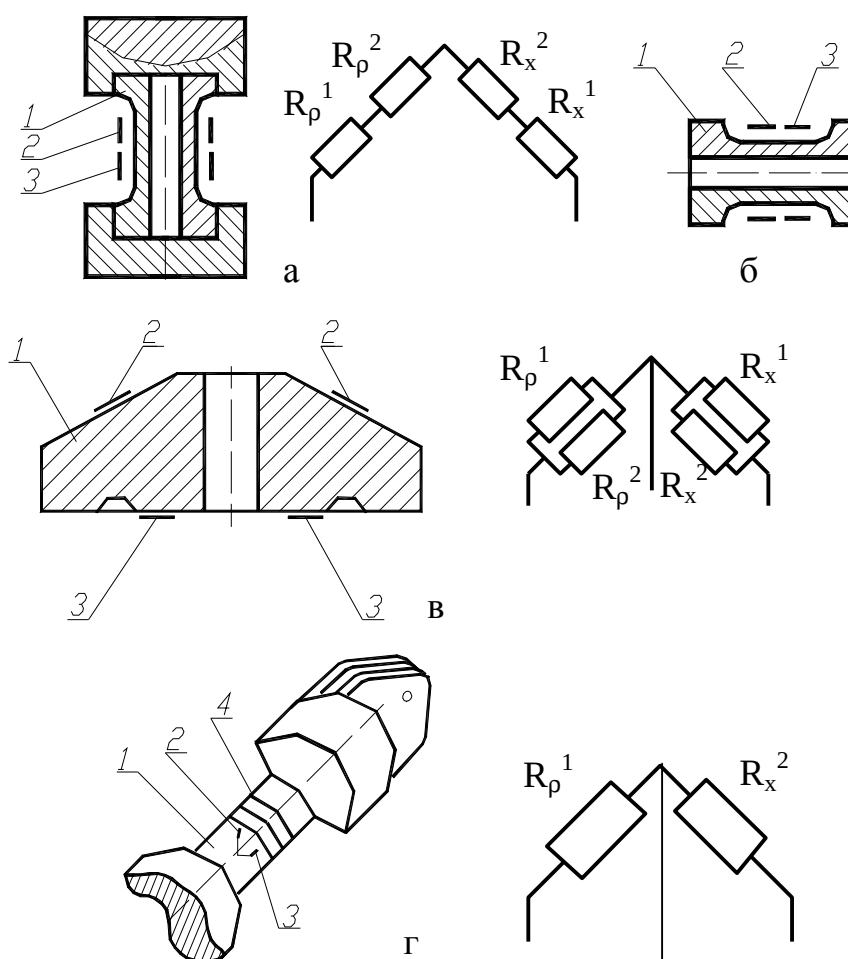


Рис. 4.81. Датчики и схемы сборки тензорезисторов:

1 – упругий элемент; 2, 3 – тензорезисторы (рабочий и компенсационный); 4 – токосъемные кольца

ния крутящего момента приведена на рис.4.82,г.

Для определения силовых факторов процесса правки применялось специальное устройство с фильерами (см. рис.5.5, п. 5.2), снабженное тензометрическими датчиками для восприятия вертикального и аксиального усилий правки: первый в виде консольной силовой балки равного сопротивления (вертикальное перемещение), второй – в виде тонкостенных втулок, расположенных на направляющих штангах и работающих на сжатие при создании аксиального усилия в фильерах (рис.3.10,б). Тарировка всех силоизмерительных каналов проводилась прямым силовым нагружением датчиков на машине Р–10, или с помощью ручного лабораторного гидравлического пресса усилием до 40 кН с замером усилия посредством динамометра ДОС–1. Тарировка датчиков крутящего момента производилась путем прямого нагружения через рычаг.

Программой экспериментов предусматривалось поэтапное исследование энергосиловых параметров.⁸ На первом этапе рассматривалось влияние технологических факторов (зазор и ширина заготовки), определялись диапазоны значений, обеспечивающие нормальный процесс профилирования данной марки материала с точки зрения качества профилей и силовой загрузки оборудования. Измерение зазоров между роликами при настройке станка производили щупами с точностью 0,01 мм. Устанавливались исходные зазоры, равные и меньшие толщины материала. Ширину заготовок изменяли в пределах от $0,1S_0$ до $1,2S_0$, толщину – от 0,8 до 2,0 мм. На втором этапе исследовали влияние свойств заготовки (толщина заготовки S_0 , предел текучести материала σ_T) при установленных оптимальных значениях технологических факторов. Исследования проводили на комплектах роликов под типоразмеры, представленные на рис.4.79.

На третьем этапе исследовали влияние поперечных и аксиальных сил, приложенных к очагу деформации со стороны правильного устройства на энергосиловые параметры профилирования.

Рабочие записи осциллограмм проводили с помощью измерительного комплекса, собранного на базе станка ЭГПС–350 (рис.4.80).

На первом этапе были определены энергосиловые параметры без влияния дополнительных сил аксиального или поперечного воздействия на очаг деформации. Как показали результаты, наибольшее влияние на силовые параметры оказывает радиальный зазор между роликами; с уменьшением зазора усилие P_N и момент M профилирования заметно увеличиваются (рис.4.82 а, б). Так, для корытообразного профиля с отбортовками уменьшение зазора с 0,8 до 0,6 толщины заготовки увеличило распирающее усилие более чем на 50%. Начиная с зазора, $S_k < 0,6S_0$ происходило обжатие и раскатка стенки профиля. Таким образом, с учетом жесткости клетки станка для нормальных условий профилирования необходимо устанавливать исходный зазор S_k в пределах от 0,6 до 0,8 от толщины исходной заготовки. Меньшее значение относится к сплавам с

⁸ Подготовка, сборка экспериментальной установки, снятие замеров выполнены с.н.с. Москвиным А.С.

большим значением предела текучести (сплав В95), большее – для сплавов Д16, 1420.

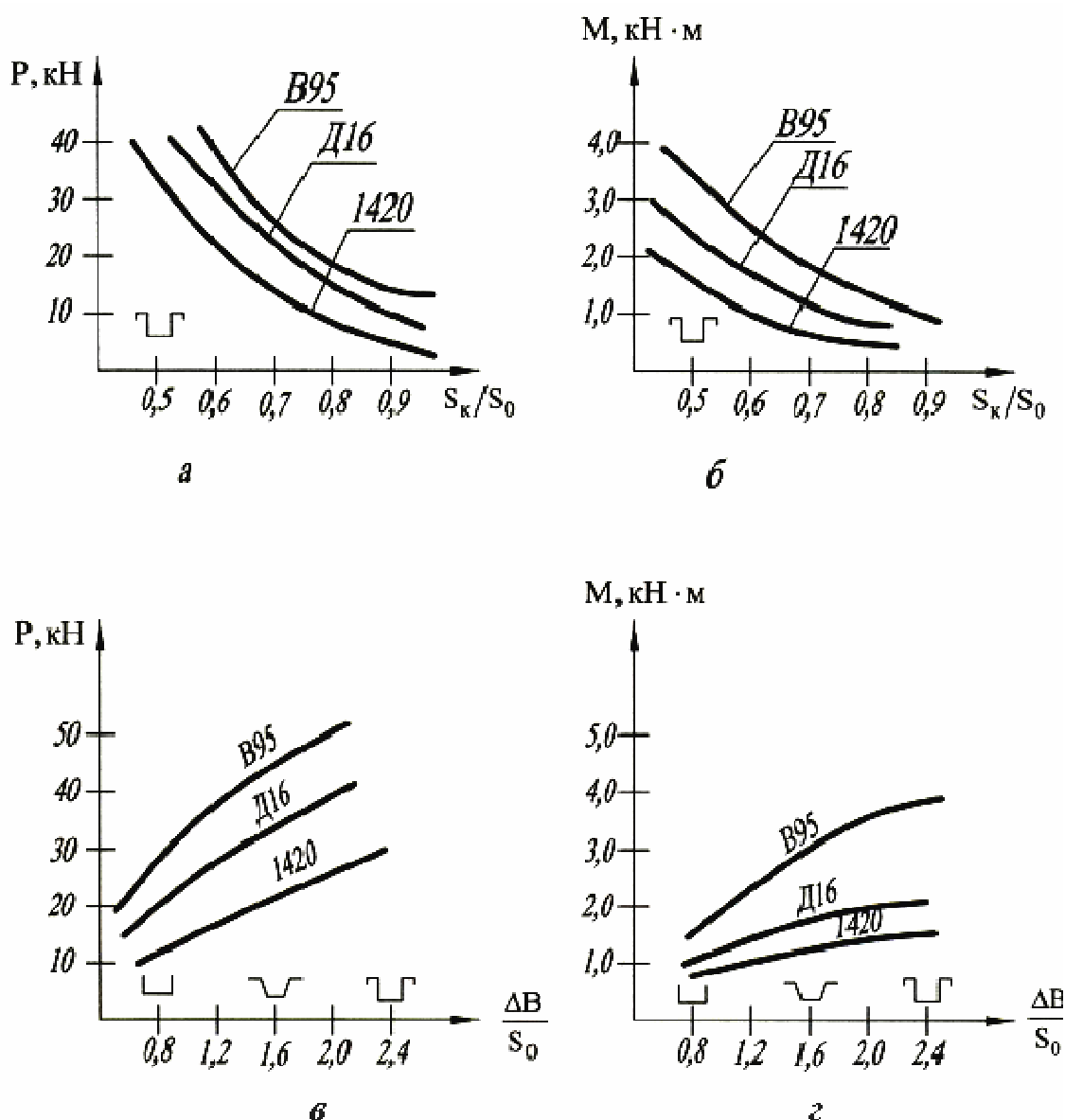


Рис. 4.82. Зависимость распирающего усилия и крутящего момента от технологических параметров

Значительное влияние оказывает избыток ширины заготовки (рис.4.82 в, г). С увеличением ширины заготовки силовые параметры профилирования увеличиваются в значительной степени. При $\Delta B/(S_0 n) > 1,0$ начинается аксиальная вытяжка профиля, которая может достигать 7 – 10 % (для мягких сплавов типа Д16М). При этом увеличиваются поводки профилей, искажается поперечное сечение. Более интенсивное увеличение силовых параметров отмечается у более прочных материалов (типа В95).

При значениях $\Delta B/(S_0 n) < 0,1$ процесс гибки мало, чем отличается от обычной гибки, и получить малые радиусы гiba не всегда возможно, особенно для сплава В95 или 1420ТГ. Поэтому диапазон значений $\Delta B/(S_0 n)$ от 0,1 до 1,0 обеспечивает наиболее благоприятные условия профилирования, причем боль-

шие значения из этого диапазона характерны для высокопрочных материалов, меньшие – для мягких (типа Д16М).

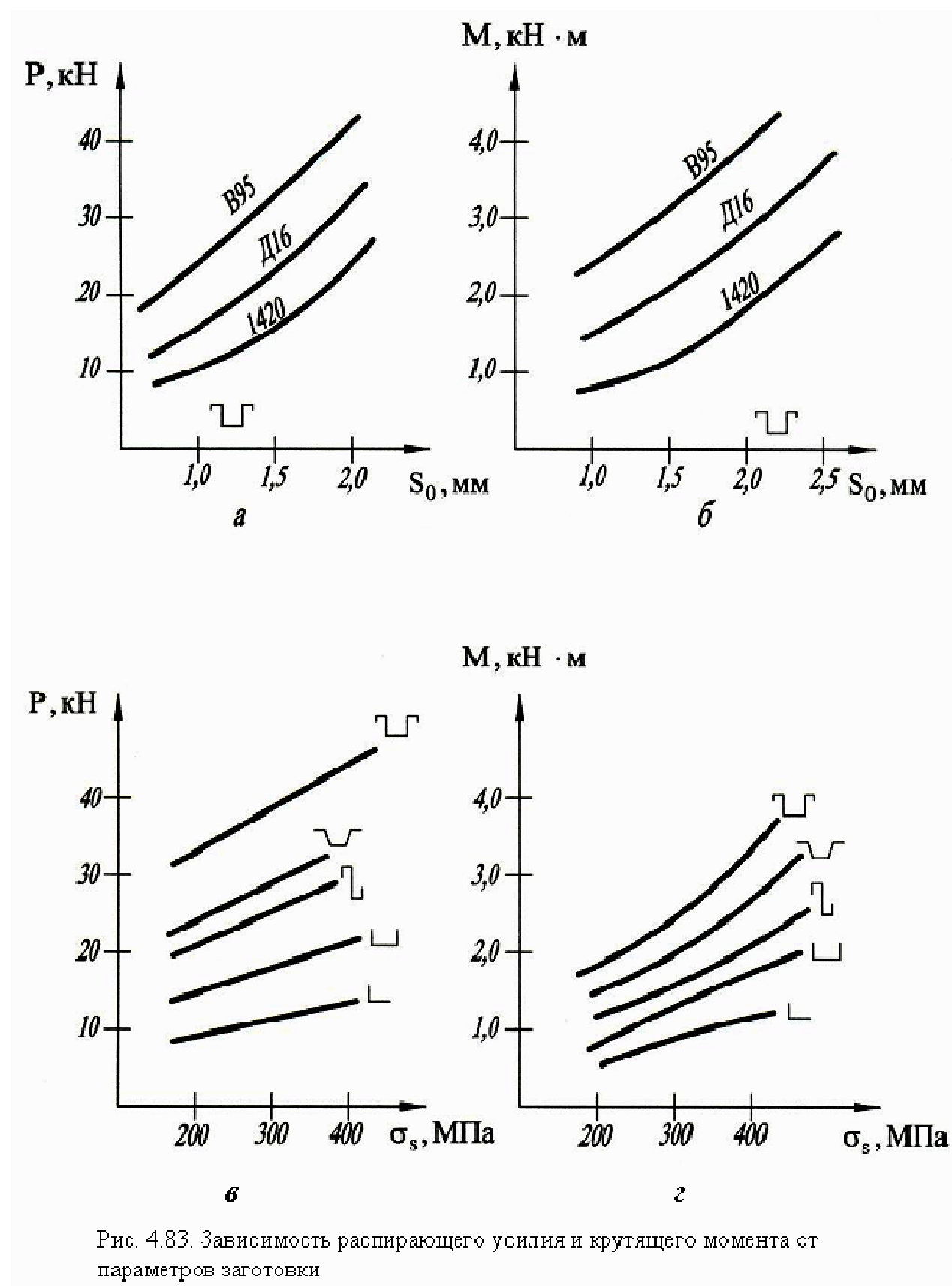


Рис. 4.83. Зависимость распирающего усилия и крутящего момента от параметров заготовки

Наиболее значительное влияние на энергосиловые параметры имеет толщина материала. Экспериментальные данные (рис.4.83 а, б) показывают интенсивный рост значений силовых параметров с увеличением толщины, что объясняется увеличением площади сечения и поперечной жесткости заготовки.

Между силовыми параметрами процесса и пределом текучести заготовки существует почти прямо пропорциональная зависимость (рис.4.83, в, г), что согласуется с формулами (4.36) и (4.37). Можно отметить удовлетворительную сходимость (в пределах 15 – 20 %) экспериментальных данных, приведенных на рис. 4.82 и 4.83, с формулами (4.36) и (4.37) [425].

Результаты исследований энергосиловых параметров включены в отраслевые РТМ [216] и были использованы при разработке очередных модификаций профилировочных станков.

Исследование силовых параметров правки (P_B и P_A) показало их зависимость от свойств заготовки и жесткости профиля: факторы, увеличивающие жесткость профиля, увеличивают и силовые параметры процесса правки. Максимальные значения усилий при зазорах в фильере $S_\phi = S_0 + 0,3$ в зависимости от типа профиля при $S_0 = 1$ мм приведены в табл. 4.23.

Таблица 4.23

Силовые параметры процесса правки

Профиль										
Материал	Д16	В95	Д16	В95	Д16	В95	Д16	В95	Д16	В95
Вертикальное усилие, Н	100	160	150	210	260	340	200	320	350	450
Горизонтальное усилие, Н	30	50	45	60	80	110	70	120	110	150

Влияние аксиальных сил, приложенных к основному очагу деформации (в окончательном переходе) со стороны выхода профиля, на энергосиловые параметры (рис. 4.84) исследовали на профилях из материалов Д16 и В95, приведенных на рис. 4.79.

Для создания максимально возможных сил аксиального сжатия профилирование осуществляли при нормальных зазорах в роликах. Соппротивление перемещению профиля в фильере правильного устройства P_A изменяли ступенчато в пределах длины одного профиля без остановки путем уменьшения рабочего зазора в фильере. Как видно из рассмотрения графиков рис. 4.84, влияние усилий аксиального сжатия в исследованном диапазоне практически не сказывается на силе (рис. 4.84 а) и лишь незначительно (на 5 – 10 %) увеличивает крутящие моменты (рис. 4.84 б).

Более поздние исследования энергосиловых параметров формообразования [3] на станках ГПС с различным числом клеток и с использованием замыкающих серег рабочих валов показали совпадение представленных результатов и новых данных в пределах 10 – 20 %.

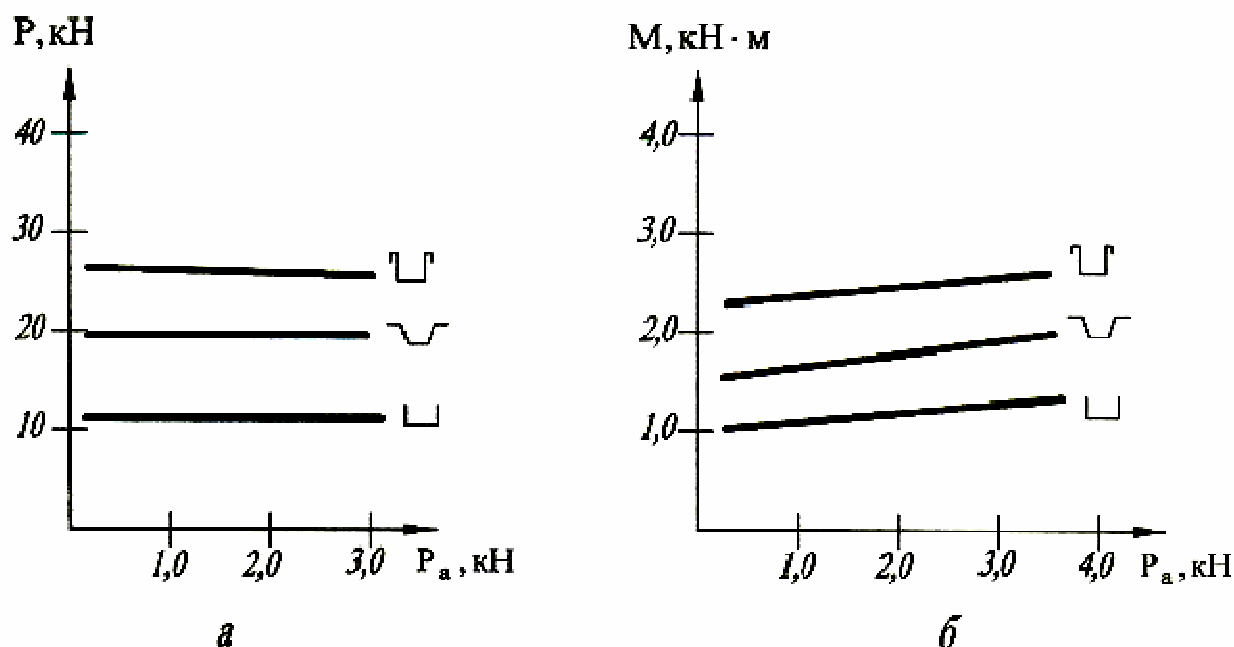


Рис. 4.84. Зависимость распирающего усилия и крутящего момента от аксиального усилия

В целом, аксиальная сила существенно влияет лишь на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и в некоторой степени на характеристики продольной кривизны за счет более равномерного распределения продольных деформаций по сечению профиля. Более существенное влияние на кривизну профиля в межклетьевом пространстве и на выходе его из последней клетки оказывают углы захода и выхода заготовки.

4.16. Влияние углов захода профиля в калибр при СИ

Как было показано в разд. 3 кривизна профиля зависит от его геометрии и от принятых технологических решений. При изготовлении специальных видов профилей выбором параметров роликов и настройкой оборудования избавиться от продольной кривизны не удастся. В этой связи надлежит исследовать влияние внешних воздействий на профиль в процессе формообразования. Возможны два варианта осуществления этих воздействий: на входе в пару роликов окончательного формообразования и по выходе из нее профиля.



Рис. 4.85. Зависимость прогиба от угла захода: $\circ$ – 1420, $\square$ – Д16Т, ∇ – Д16М

Были проведены экспериментальные исследования влияния вертикального и бокового углов захода и механических свойств материала заготовки на кривизну получаемого профиля [225]. Изготавливали швеллерные профили (рис. 4.79 а) из материалов 01420, Д16М и Д16Т. Для каждого уровня варьирования входных параметров изготавливали партию из пяти профилей. Экспериментальные результаты, отражающие характер влияния угла захода на продольный прогиб, представлены на рис. 4.85, где прямая получена обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Следует отметить, что технология, при которой центры тяжести сечений профиля на различных переходах располагаются на одной прямой, не может обеспечить прямолинейности профиля. На рис. 4.85 такой настройке стана соответствует продольный прогиб в нижнюю полуплоскость, равный 40 мм/м. При угле захода $\psi = 3^\circ$ продольный прогиб устраняется полностью. Интересно отметить слабую зависимость прогиба профиля от механических свойств заготовки, хотя и прослеживается тенденция к уменьшению поворота с увеличением предела текучести материала.

Боковой угол захода (в горизонтальной плоскости) изменяли от 6° в обе стороны. При этом оказалось, что его влияние на продольный прогиб отсутствует, а на боковой прогиб (саблевидность) влияние его незначительно. Однако скрутка возросла от нуля до 30 град/м, что объясняется различием условий формообразования вертикальных стенок вследствие бокового смещения профиля.

Отметим воздействие угла захода ψ на горизонтальные характеристики сечения получаемого профиля. На рис. 4.86 даны точки замеров толщины различных элементов профиля из сплава Д16М. Как видно из табл. 4.24, с увеличением угла захода процесс формообразования интенсифицируется, что выражается в утолщении зоны сгиба. При этом утонение стенки уменьшается, а торцевые участки несколько утолщаются.

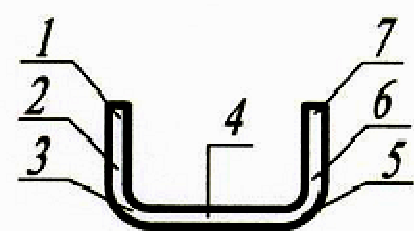


Рис. 4.86. Точки замеров толщины

Таблица 4.24
Характеристики сечений профилей из сплава Д16М

Угол захода, град.	Относительное утолщение, % в точках						
	1	2	3	4	5	6	7
-5	4,4	0,5	7,9	-2,5	6,6	0,4	4,4
2	4,1	0,4	7	-1,6	6,5	0,3	2,7
4	6,5	0	9,2	-1,8	12,9	0	5,5
6	7,2	0,2	12,7	-1,8	13,6	0,2	9,1
8	10,1	0,1	12,8	-0,9	14,8	0,2	11,1
15	9,9	0,1	12,6	-0,8	14,4	0	9,9

Создание условий для интенсификации процесса за счет изменения угла захода в многоопорных станках возможно тремя путями. Во-первых, за счет смещения калибра в роликах; во-вторых, за счет смещения валов клетки окончательного формообразования; в-третьих, за счет введения дополнительного регулируемого по высоте нажимного ролика между клетями окончательного и предварительного формообразования.

Проанализируем данные возможности с точки зрения их использования применительно к станкам семейства ГПС, применяемых для изготовления профилей стесненным изгибом. Первая возможность должна быть отвергнута, поскольку смещение калибра в вертикальной плоскости относительно оси профилирования связано с большим перепадом скоростей нижнего и верхнего роликов, что отрицательно влияет на точность геометрических параметров и качество поверхности профиля.

Вторая возможность может быть реализована на станках типа ГПС-200, однако это усложняет процесс настройки и в последующих моделях станков нижние валы выполнены нерегулируемыми по высоте. Применение данного приема оправдано лишь в случаях изготовления специальных профилей, у которых дополнительную кривизну не удастся уменьшить с помощью других мероприятий.

Что касается использования нажимного ролика, то на рис. 4.87 даны зависимости прогиба от усилия F нажимного ролика для того же швеллерного профиля, описанного выше.

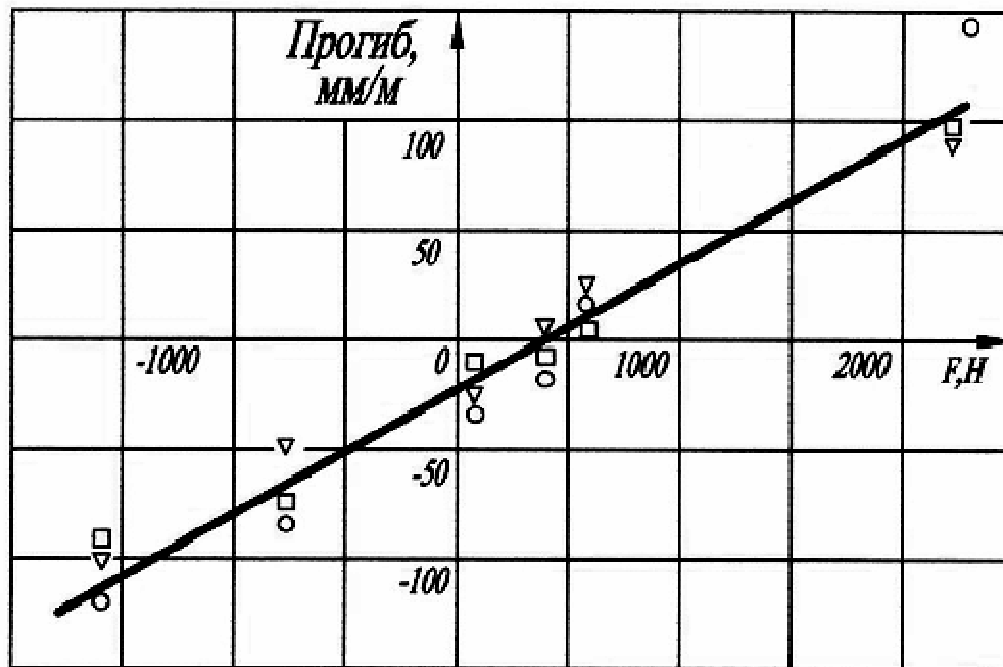


Рис. 4.87. Зависимость прогиба профиля от усилия F : ○ – 1420; □ – Д16Т; ▽ – Д16М

Таким образом, последние две возможности изменения угла захода позволяют интенсифицировать процесс, что является особо важным при изготовлении специальных видов профилей. В модификациях станков модели ГПС–

300 и выше предусмотрена возможность установки нажимного ролика или роликового калибра. Однако применение нажимного ролика ограничивается случаем изготовления профилей из рулона, поскольку возникают проблемы задания заготовки в калибр роликов окончательного формообразования.

Отметим, что влияние углов захода профиля в калибр также значительно и при использовании метода интенсивного деформирования (см. рис. 3.24). Данные результаты были использованы для разработки технологии производства профилей с продольной кривизной: стеклоподъемников автомобиля УАЗ стесненным изгибом [62] и бамперов автомобилей ВАЗ методом интенсивного деформирования [422].

Придание профилю продольной кривизны или саблевидностью возможно также и путем локального обжима заготовки, что создает определенные проблемы в случае заготовок с органическим покрытием.

4.17. Формообразование МИД профилей с покрытием

Проблемы нарушения покрытия возникают при изготовлении методом интенсивного деформирования сложных профилей, а также профилей с большой высотой подгибаемых полок. Чаще всего проблемы покрытия связаны с необходимостью локального обжима заготовки с целью выравнивания или, наоборот, создания градиента продольных деформаций по поперечному сечению профиля в зависимости от требования обеспечения прямолинейности профиля или придания ему продольной кривизны. Некоторые виды профилей имеют элементы двойной толщины, требующие зачастую осадки и соответствующего компенсирующего локального обжима других его элементов. В условиях локального обжима заготовки в закрытом калибре можно принять схему плоской деформации, поскольку движение материала в поперечном направлении затруднено. Специальный интерес представляют собой условия, при которых происходит нарушение целостности покрытия или изменение его параметров до такой степени, что профиль становится непригодным для его использования по назначению.

В работе [426] нами рассмотрены условия локального обжима профиля на некотором участке шириной b и с первоначальной толщиной s_0 (рис. 4.88). Механические характеристики субстрата (основного материала) набором задавали следующим образом:

$$x_i(x_3) = \begin{cases} x_i^s, & 0 < x_3 \leq \frac{s}{2} - h \\ x_i^s, & \frac{s}{2} - h < x_3 \leq \frac{s}{2} \end{cases}, \quad (4.38)$$

где $i = 1, 2, 3 \dots$ относится к показателям в порядке их следования: модуль Юнга, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и т.д.;

s, h – общая толщина заготовки и толщина покрытия (текущие);

s, c – верхние индексы показателя, относящиеся к субстрату и покрытию соответственно.

Построена модель контактного взаимодействия инструмента и заготовки, несколько отличная от упрощенного уравнения Кармана [427], для которого известна асимптотическая оценка, а замкнутое решение получено лишь при дальнейших упрощающих предположениях.

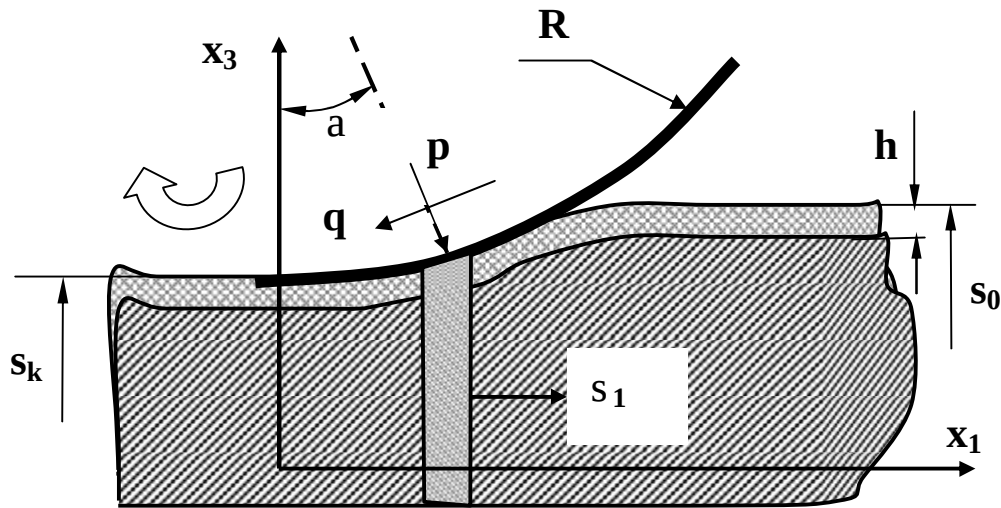


Рис. 4.88. Схема локального обжима элемента профиля

Получено следующее значение контактного давления $p(x)$:

$$p(x_1) = \frac{4 \cdot k}{f \cdot R} \cdot \exp(2 \cdot h(x_1)) \cdot \left[x_{10} \cdot \exp(-h(x_{10})) - x_1 \cdot \exp(-h(x_1)) + \int_{x_1}^{x_{10}} \exp(-h(x)) \cdot dx \right], \quad (4.39)$$

где k – максимальное касательное напряжение ($k = \sigma_T / \sqrt{3}$); f – коэффициент трения; R – радиус ролика; s_k – зазор в роликовом калибре; $x_{10} \approx \sqrt{R \cdot (s_0 - s_k)}$.

В формуле (4.39) $h(x) = f \cdot \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{s_k}} \cdot \arctg\left(\frac{x}{\sqrt{R \cdot s_k}}\right)$.

К сожалению, интеграл в решении (4.39) не может быть вычислен аналитически, однако само решение легко табулируется, например, с помощью программы MathCAD 2001 Pro. Результаты вычисления приведены на рис. 4.89, где зазор в калибре задан через степень обжима заготовки ϵ_3 . Контактные давления здесь представлены в безразмерном виде $p(x_1)/2k$.

Для предварительной оценки полученного решения производили локальный обжим заготовок с покрытием в роликах диаметром 150 мм на профилегибочном станке ГПС-500М6 со степенью обжима 2, 10, 20 и 50 %. Из заготовок вырезали темплеты размером 15x20 мм, у которых с целью повышения точности производили многократное измерение толщины с точностью 0,01 мм с последующим осреднением.

Темплеты по группам материалов заливали в эпоксидную смолу, шлифовали и подвергали исследованию на предмет состояния поверхностного слоя на микроскопе МИМ-8М с увеличением в пределах от 340 до 1000. Поверхность исследовали с помощью трубки МПБ-2 с 24 кратным увеличением, затем производили оценку прочности слоя покрытия методом царапания иглой с после-

дующим сравнением прикладываемых к игле усилий. Механические характеристики субстратов всех исходных материалов укладывались в пределы заданного допуска.

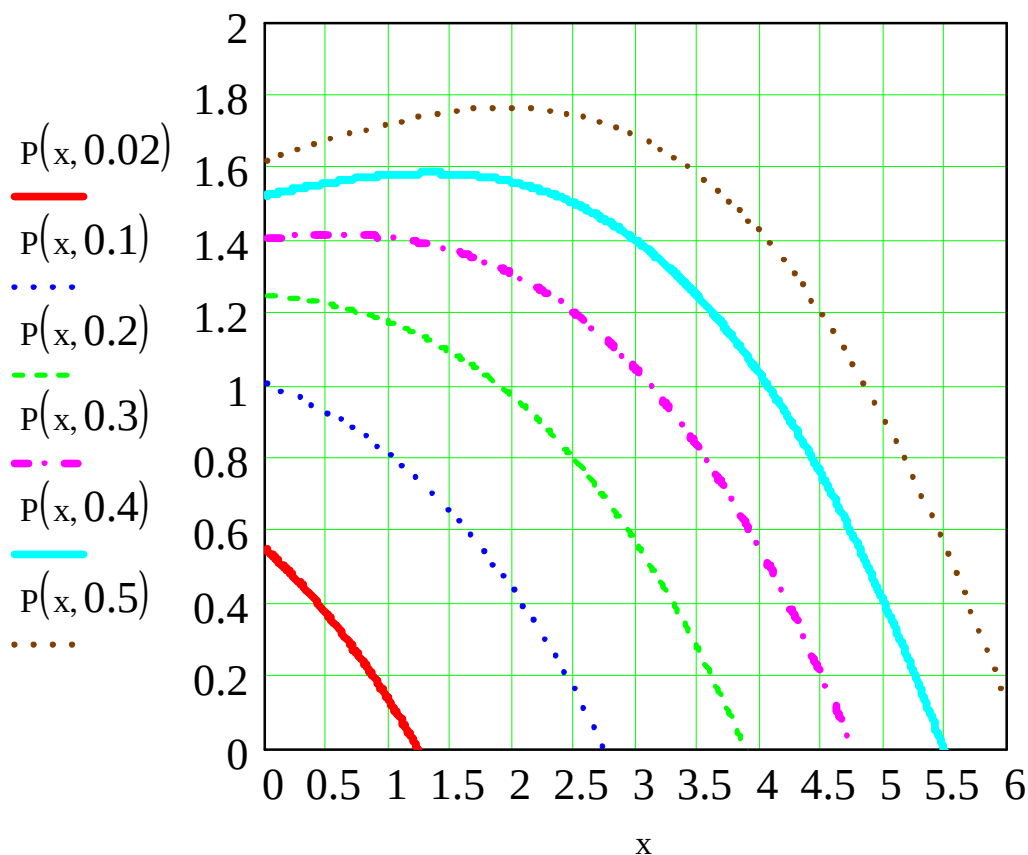


Рис. 4.89. Зависимость относительного контактного давления в зоне обжима от координаты x_1 и степени обжима ϵ_3

Данные табл. 4.25 указывают на слабую зависимость прочности покрытия от толщины субстрата (см. свойства полиэстера в первых трех строках таблицы). На рис. 4.90 показан микрошлиф образца толщиной 0,53 мм при степени обжима 37 %, откуда видно, что отслоения покрытия отсутствуют.

Таблица 4.25

Результаты обжима стальных заготовок с покрытием

Материал покрытия	S_0 , мм	Н, мкм	Степень обжима ϵ , %							
			2		10		20		40	
			1	2	1	2	1	2	1	2
Полиэстер	0,53	25	-	-	+	-	+	-	+	-
Полиэстер	0,95	25	-	-	+	-	+	-	+	-
Полиэстер*	1,61	25	-	-	+	-	+	-	+	-
Полиуретан	0,63	70	-	-	-	-	+	-	+	+
Пластизоль	0,68	80	-	-	-	-	+	-	+	+
* - без цинкового покрытия										
1 - наличие продольной текстуры покрытия										
2 - наличие отслоения покрытия										

Однако толщина покрытия имеет существенное значение. Рис. 4.89 показывает, что контактные давления могут превосходить предел текучести без существенного нарушения покрытия, если оно относительно тонкое (см. также данные приведенной таблицы). В случае толщины покрытия более 50 мкм возможно его повреждение в виде наплывов и разрушений (рис. 4.91). Что касается влияния текстуры покрытия (вследствие обжима) на служебные характеристики профиля, то данный вопрос может быть прояснен с помощью соответствующих испытаний. Метод царапания показывает, что при степенях обжима более 30 % происходит некоторое разрыхление покрытия (усилие царапания несколько снижается по сравнению с исходным материалом).



Рис. 4.90. Зона сцепления субстрата и покрытия после обжима в роликах

Дополнительные исследования исходного материала и заготовок после прокатки с использованием устройства для испытания покрытия на отслоение [428] с учетом предыдущего позволили сделать следующие выводы: 1) Локальный обжим заготовок с органическим покрытием допустим в пределах степени обжима 10% практически для всех материалов; 2) Покрытие толщиной более 50 мкм не допускает степени обжима, превосходящие 20-30 %.



Рис. 4.91. Наплывы покрытия из полиуретана и пластизола толщиной более 50 мкм после обжима в роликах при $\epsilon_z \approx 50 \%$

Наряду с проблемами покрытий определенной спецификой обладает и технология производства перфорированных профилей.

4.18. Особенности изготовления МИД перфорированных профилей

Для рассмотренного выше перфорированного углового профиля (рис. 4.66, п. 4.12) были выявлены проблемы возникновения эллиптичности отверстий при формообразовании за пять переходов. Для устранения данной проблемы предприняты исследования на комплектах роликов с различными видами замыкания калибров (рис. 4.92) для выявления особенностей формообразования угловых профилей с отверстиями [420].

Схема «б» (рис. 4.92), осуществлявшаяся по режиму подгибки $10^\circ - 20^\circ - 30^\circ - 40^\circ - 45^\circ$, была принята в качестве основной и подвергнута более тщательному исследованию. Формуемую заготовку извлекали из калибров, разре-

зали по местам осевых плоскостей калибров (рис. 4.93 а), сканировали плоские участки полок для определения главных осей деформированных эллипсов в увеличенном масштабе в среде AutoCAD – 2000 с использованием «эластичных шаблонов») (рис. 4.93 б).

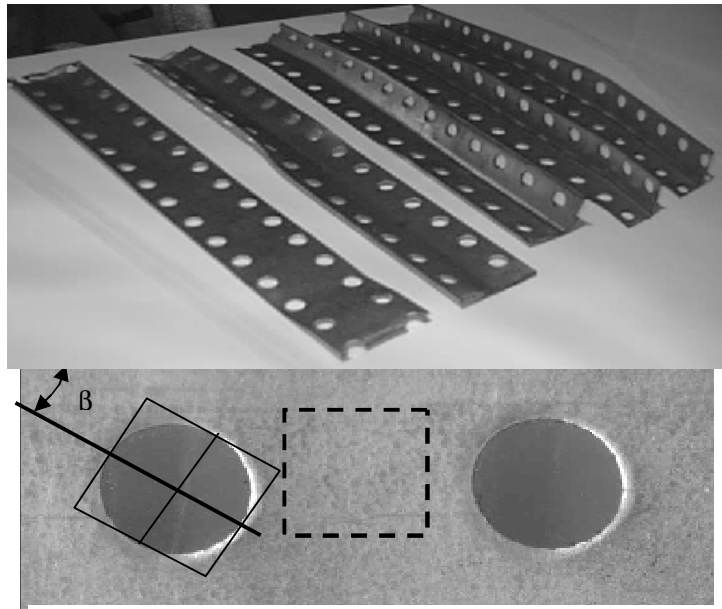


Рис. 4.93. Изучение размеров отверстий:
а – образцы для исследований; б – определение главных направлений деформаций

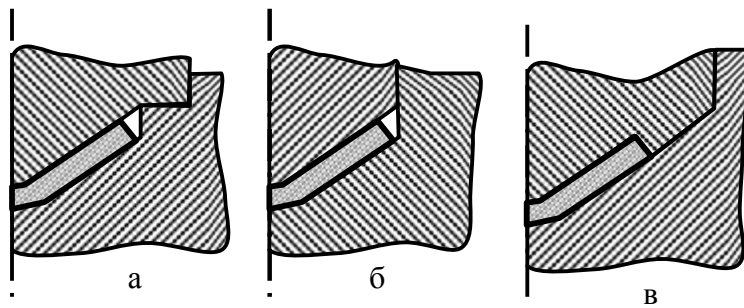


Рис. 4.92. Замкнутые роликовые калибры:
а – с горизонтальным замыканием;
б – с вертикальным замыканием;
в – с коническим замыканием

мости деформаций от текущего номера перехода (или координаты, отсчитываемой вдоль оси профилирования) имеют вид:

$$e_1 = -1.536 \cdot 10^{-3} \cdot N_T^2 + 0.014 \cdot N_T - 0.0074, \quad (4.40)$$

$$e_2 = 2.56 \cdot 10^{-3} \cdot N_T^2 - 0.016 \cdot N_T + 0.0077, \quad (4.41)$$

где N_T – текущий номер перехода.

Уравнения (4.40) и (4.41) в целом соответствуют условию несжимаемости материала заготовки $\sum_{i=1}^3 e_i = 0$ для плоского деформированного состояния с увеличением «невязки» при движении к последней клетки профилегибочного

При этом определяли угол β между большей осью эллипса и кромкой заготовки. Затем под найденным углом с помощью угломера производили трассировку большей оси окружности, а перпендикулярно ей – трассировку меньшей оси. Измерение размеров отверстий производили с помощью электронного штангенциркуля с погрешностью 0,01 мм при пятикратном измерении каждого из размеров с последующим осреднением. Для каждого отверстия производили расчет логарифмических деформаций e_1, e_2 для большей и меньшей осей соответственно, которым на рис. 4.94 соответствуют их абсолютные значения с условными обозначениями $D_{б.э} (D_б)$, $D_{м.э} (D_м)$. Обозначениям в круглых скобках соответствуют кривые, полученные полиномиальной аппроксимацией экспериментально-расчетных данных в среде EXCEL – 2000 Pro. Аналитические зависи-

станка. Анализ уравнений (4.40) и (4.41) показывает, что деформация отверстий имеет тенденцию к росту с увеличением номера перехода и наиболее значительные всплески деформаций проявляются вблизи осевой плоскости роликов. Более тщательный анализ процесса показал, что столь значительные деформации полки возникают из-за воздействия на нее силы P под углом к ее кромке со стороны замыкающих буртов нижних роликов перед осевой плоскостью роликового калибра.

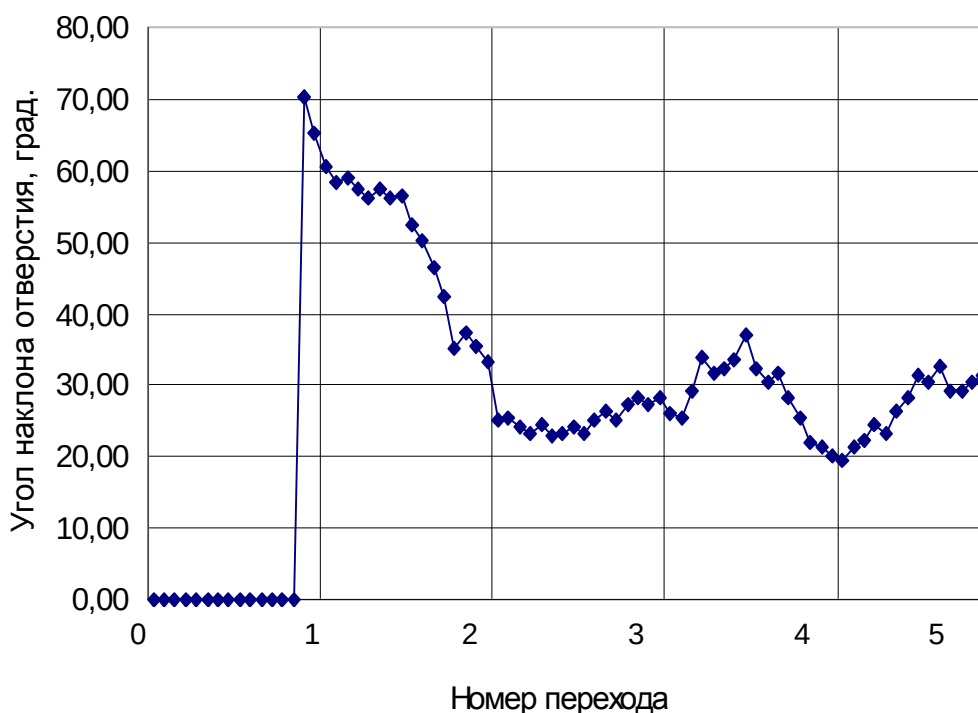


Рис. 4.95. Поворот большой оси эллипсов относительно кромки

Действие этой силы приводит также к изгибу заготовки в целом перед осевой плоскостью. В результате часть полки, находящаяся в очаге пластической деформации, оказывается нагруженной в дополнение к схеме плоских разноименных напряжений и касательными напряжениями. На первых переходах действие описанной схемы нагружения проявляется наиболее ярко (см. рис. 4.95 и 4.96), а к последним переходам происходит небольшое снижение деформаций вследствие изменения точки приложения силы P (рис. 4.97). С увеличением угла подгибки также изменяется величина и направление действия силы P вследствие изменения суммарного угла подгибки. При этом угол поворота большей оси эллипса имеет тенденцию к уменьшению (см. рис. 4.95). Эллиптичность отверстий хотя и несколько уменьшаются к последнему переходу, однако их размеры выходят за допустимые пределы. Надлежит заметить, что профиль той же геометрии сечения, полученный по данной технологии из сплошной заготовки не имел дефектов.

Для снижения деформаций полки путем устранения влияния буртов роликов была опробована схема замыкания роликов с коническими участками (рис. 4.92 в). Протяженность конического участка брали шириной не менее величины одностороннего сужения/стеснения профиля, что определяется шириной полки и приращением угла подгибки в текущем переходе [375]. В этом

случае устранялась тангенциальная составляющая силы P , влиявшая в предыдущей схеме на вид деформированного состояния и изгиб профиля. Режимы подгибки полок оставались теми же, что и в схеме рис. 4.92б. Контроль отверстий по переходам и на готовом профиле производили калибрами-пробками, изготовленными для контрольных операций в серийном производстве. Изготовленная контрольная партия профилей (около 500 погонных метров) не имела отклонений от требований чертежа. Технология и оборудование внедрены на одном из предприятий г. Санкт-Петербурга.

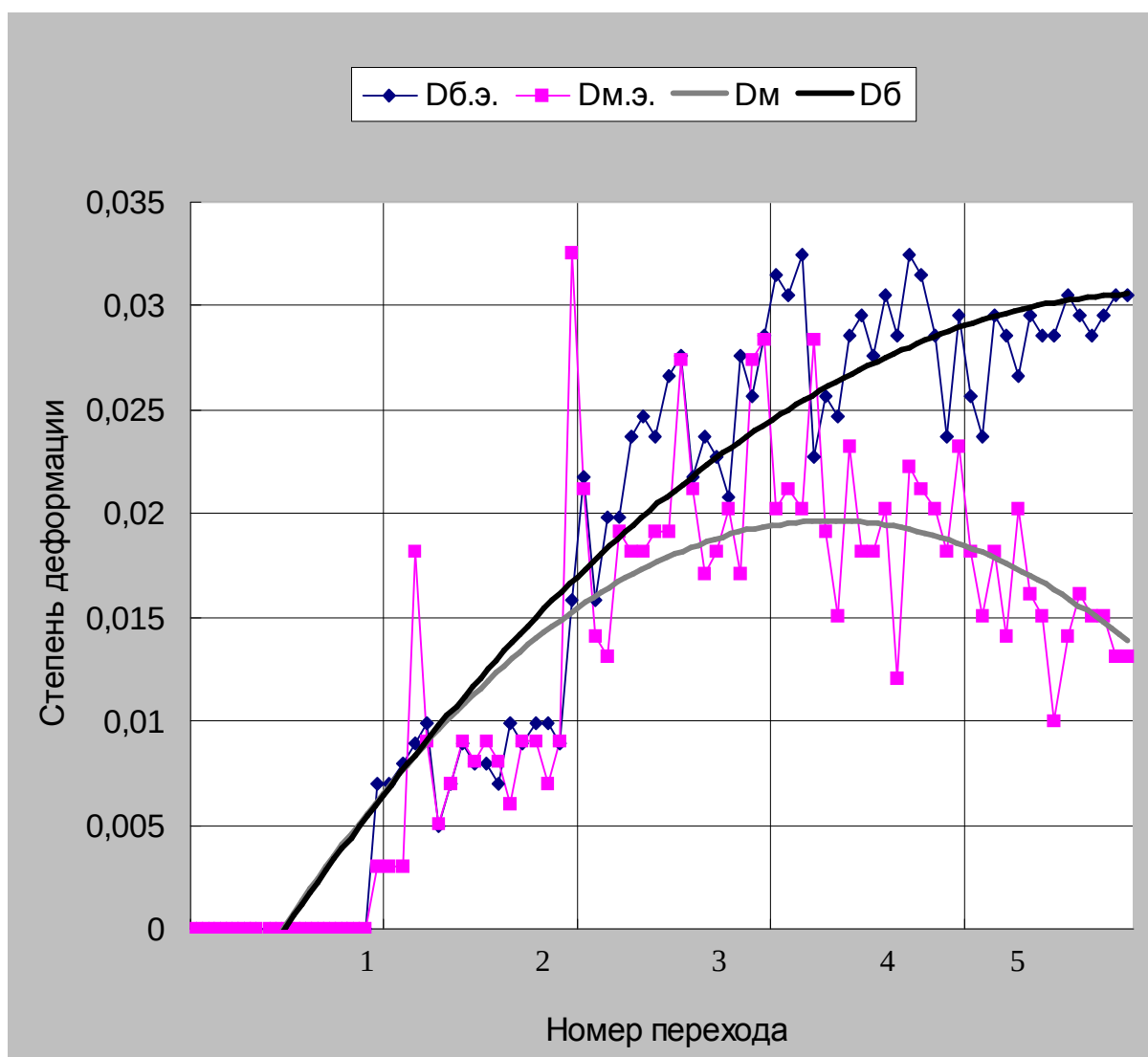


Рис. 4.96. Степени деформаций полки по переходам

Из сравнения описанных технологий следует, что замыкание роликовых калибров с конической посадкой является предпочтительным. При наличии крупных отверстий торцевое поджатие (при использовании метода интенсивного деформирования или стесненного изгиба) следует практиковать с большой осторожностью, поскольку в этом случае возможно изменение формы отверстия, потеря устойчивости заготовки или возникновение дефектов типа «локального продавливания».

Аналитическое исследование поведения перфорированной заготовки в межклетьевом пространстве сталкивается с нарушением условия сплошности заготовки, однако, по нашему мнению, эту проблему можно отчасти обойти, заменив заготовку эквивалентной сплошной, той же толщины, но с увеличенным размером полки на приведенную величину удаленного перфорацией материала. Возможна эквивалентная замена перфорированной заготовки сплошной заготовкой меньшей толщины с сохранением размера полки. Изложенные гипотезы подлежат проверке численным моделированием с помощью метода конечных элементов и экспериментальным исследованием процессов профилирования. В то же время вопрос преимущества технологии производства профилей из сплошных заготовок для производства перфорированных профилей остается весьма настоящим.

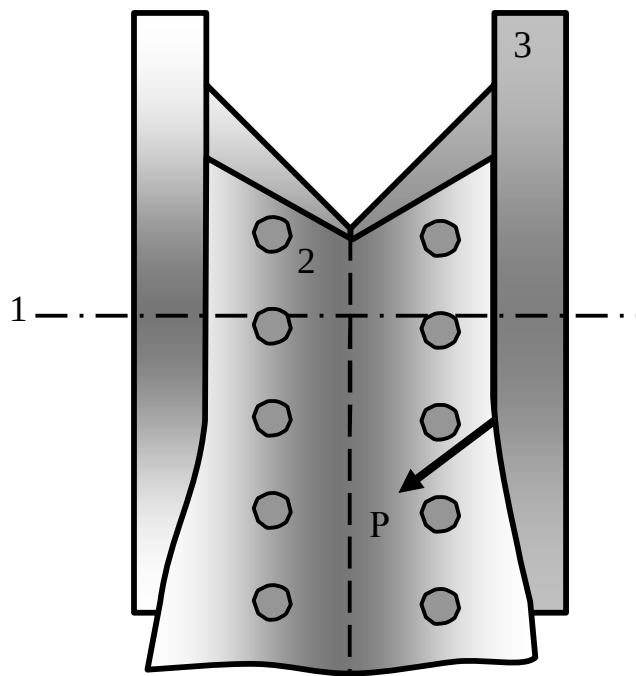


Рис. 4.97. Действие бурта ролика: 1 – осевая плоскость; 2 – заготовка; 3 – бурт ролика

4.19. Особенности изготовления профилей с рифтами

Изготовление профилей с элементами жесткости типа рифтов в донной части существенно отличается от изготовления аналогичных профилей без рифтов. Это связано в первую очередь с «ослаблением» режима подгибки из-за прогибов гладкой донной части профиля и отсутствием такового при формообразовании профиля с рифтами (см. разд. 3).

Рассмотрим экспериментальные данные [429] по изготовлению профиля С – образного типа размером 145x45x13x1 мм с треугольным рифтом высотой 10 мм с шириной основания 20 мм и профиля размером 195x45x13x0,7 мм с теми же формой и размерами рифта за шесть переходов.⁹ Радиусы кривизны зон сгиба и участков сопряжения составляли для первого и второго профиля 2 мм и 1,5 мм соответственно. Эксперименты проводили на профилегибочном станке ГПС-300М6 производства ФГУП «Ульяновский НИАТ» при одном и том же режиме подгибки полок по переходам по следующей программе:

1. Формообразование профиля с габаритами 145x45 мм с гладким дном.
2. Формообразование того же профиля с формовкой полного рифта на первом и втором технологических переходах.

⁹ Реализация экспериментальной отработки осуществлена н.с. НИАТ С.В. Филимоновым

3. Формообразование того же профиля с формовкой рифта постепенно по переходам.
4. Формообразование профиля с габаритами 195x45 мм с формовкой рифта постепенно по переходам.
5. Формообразование того же профиля с увеличением базовых диаметров роликов на 1 % от перехода к переходу.

При формообразовании профиля меньших габаритов в межклетьевом пространстве наблюдался прогиб донной части до 3,2 мм, дефекты кромок отсутствовали.

При формообразовании рифта за два перехода возникал излом кромки, начиная с четвертого перехода. В донной части профиля по сторонам рифта наблюдалось отклонение прямолинейных участков, примыкающих к рифту, от горизонтали на -5° в первой паре роликов с переходом к углу $+3,5^\circ$ на втором переходе. Дальнейшее изменение углов на последующих переходах составляло: $1,5^\circ$, 3° , $1,5^\circ$ и 0° . При этом ширина профиля, измеренная в мм, изменялась по переходам следующим образом: 259 – 236 – 203 – 183 – 165 – 149. Протяженность зоны плавного перехода, измеренная в мм, изменялась неравномерно: 30 – 140 – 350 – 190 – 265 – 380. Расстояние между изломами по левой и правой полкам, измеренное в мм, с отсчетом от плоского участка заготовки, составляло: 103,5 – 360 – 280 – 440 – 410 – 450 – 180 и 95 – 340 – 470 – 390 – 440 – 440 – 80 соответственно.

При равномерной формовке рифта по переходам со стеснением 1,5 мм за переход с соответствующим изменением ширины от 29 до 20 мм и высоты рифта от 2 до 10 мм в межклетьевом пространстве наблюдался «развал» профиля (на 4 – 6 переходах порядка 14-20 мм), однако, излом полок отсутствовал. Характеристики получаемого профиля соответствовали требованиям технических условий на поставку профиля.

Формообразование профиля с габаритами 195x45 мм с постепенной формовкой рифта по переходам сопровождалось «развалом» профиля на 12-20 мм на 4 – 6 переходах и изломом его полок. При этом протяженность зоны плавного перехода изменялась неравномерно от 60 до 340 мм с колебаниями до 100 мм.

Изготовление того же профиля с увеличением по переходам базовых диаметров роликов на 1 % от перехода к переходу наблюдался натяг кромки с уменьшением «развала» профиля. Излом полок отсутствовал, а зона плавного перехода изменялась по переходам следующим образом (протяженность в мм): 65 – 210 – 380 – 400 – 400 – 400. Параметры готового профиля соответствовали техническим условиям на его поставку. Результаты отработки технологии производства профилей с рифтами в донной части приведены на рис. 4.98.

Таким образом, для получения качественного С-образного профиля с рифтами в донной части следует использовать следующие технологические схемы: а) формовку рифта производить постепенно и равномерно по переходам [429]; б) обеспечивать натяг кромки путем увеличения базовых диаметров роликов по переходам на 1 % [168, 430].

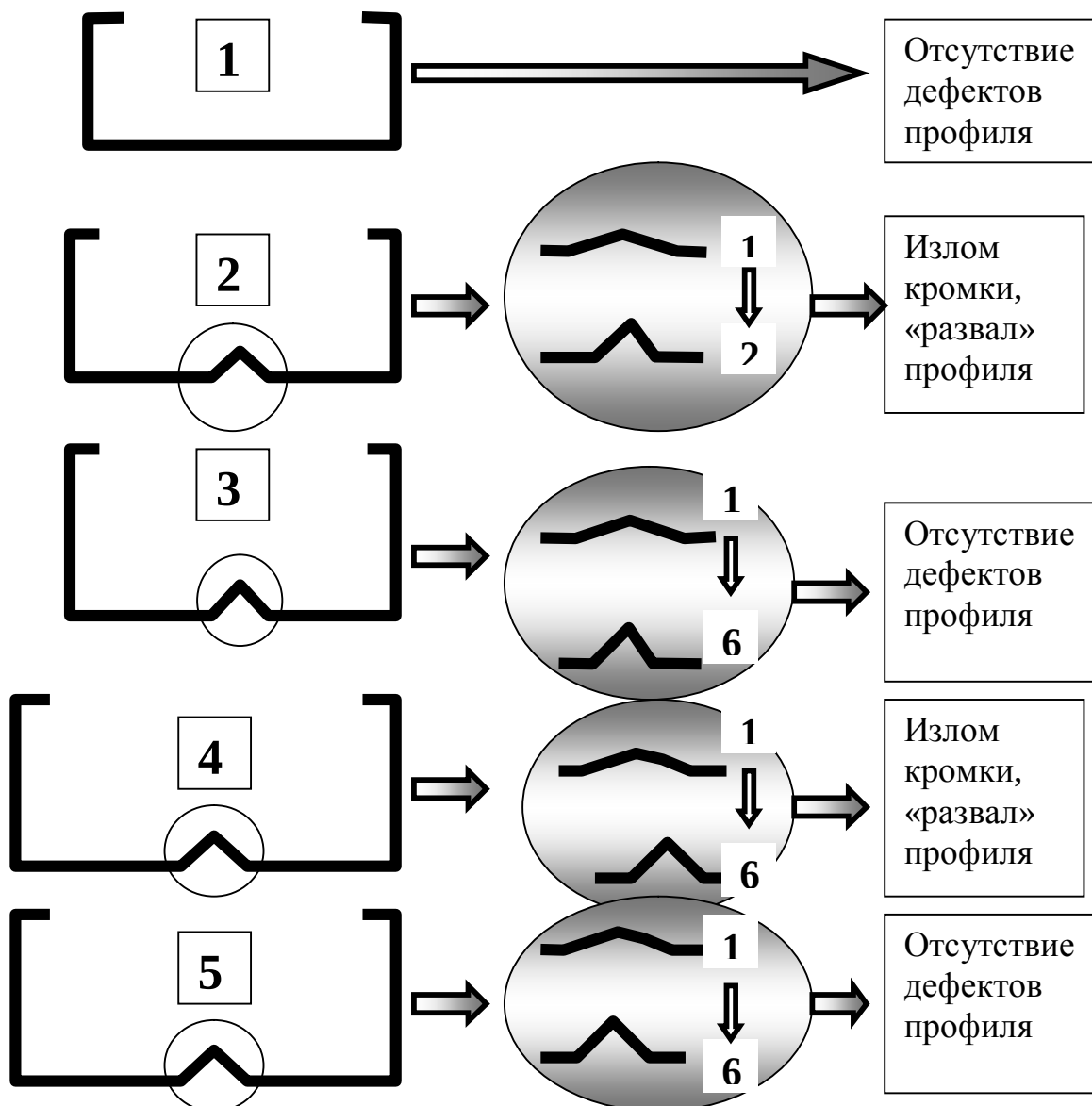


Рис. 4.98. Схемы формовки рифтов и результаты отработки технологии изготовления С-образных профилей с рифтами в донной части

В заключение можно отметить, что формовка профилей с гладким дном и профилей с рифтами в донной части существенно различаются по схемам формообразования. Схемы формообразования весьма чувствительны к форме, размерам и количеству рифтов, что составляет отдельную задачу исследований.

Выводы

Исследование уголкового зоны МКЭ на основе модели Горлача-Ефимова и с помощью программы ANSYS показало, что торцевое сжатие в практическом диапазоне величин разгружает наружный контур (по деформациям) в 2...2,5 раза; нейтральный слой сдвигается к наружному контуру; фактор Лоде по напряжениям в целом отвечает условиям плоской деформации.

Исследование пластической неустойчивости на внутреннем контуре дает результаты, близкие к экспериментальным (в пределах 10 –12 %). Предсказанные меха-

низмы разрушения композитов подтверждены экспериментально и численным моделированием процесса с помощью МКЭ.

Применение модифицированного метода Смирнова-Аляева позволило выявить деформационную картину в угловой зоне, в целом совпадающую с результатами исследований МКЭ; тонкие методы исследования показывают, что торцевое сжатие вызывает увеличение плотности дислокаций в зоне сгиба, а остаточные напряжения распределены по сечению профиля неравномерно, с всплесками в угловых зонах.

Из изученных схем радиального нагружения наиболее благоприятной схемой является схема с посадкой наружного контура, допускающая утолщение зоны сгиба до 15 % и внутренний радиус порядка одной толщины; при этом происходит регуляризация внутреннего контура зоны сгиба.

Экспериментальное исследование схем формообразования при СИ позволило определить необходимое число переходов и наиболее благоприятные схемы, которые в формализованном виде вошли в состав отраслевой НТД.

Экспериментальные значения протяженности зоны плавного перехода подгибаемой полки с точностью до 10 % совпадают с теоретической моделью для СИ и МИД. Модель применяется в качестве одного из ограничений на углы подгибки, а также для расчета межклетьевого расстояния станка ГПС.

Статистический анализ дефектов при МИД показал, что препятствием интенсификации является кромковая волнистость подгибаемых полок, которой наиболее подвержены профили швеллерного типа (32 %); выявлены предельные размеры подгибаемых полок типовых профилей, для которых характерна потеря устойчивости.

Установленная зависимость предельного угла подгибки за один переход от толщины и ширины заготовки хорошо согласуется с предложенным критерием КВ и дает мажорантное ограничение на углы подгибки при разработке технологии.

Оценка деформаций полок косвенным методом и с помощью измерения твердости показывает их удовлетворительное совпадение с результатами теоретических расчетов и данными других авторов.

Подтвержден «эффект желобчатости» для профилей с широкой донной частью, учет которого при проектировании позволяет ужесточать режим подгибки углов до $(3 - 4)^\circ$ и тем самым уменьшать число переходов.

Разработанная гибридная модель числа переходов для МИД удовлетворительно согласуется (в основном, в пределах 20%) с частными моделями, полученными обработкой экспериментальных данных, и обладает хорошими прогностическими возможностями.

Применение аксиального поджатия при СИ позволяет снизить остаточные напряжения практически на порядок, однако применение его ограничивается лишь весьма специальными случаями.

Результаты экспериментальных исследований энергосиловых параметров позволяют производить расчет характеристик профилегибочных станков.

Установлено, что углы захода профиля в калибр при СИ существенно влияют на параметры сечения профилей и продольную кривизну профиля.

Выявлено, что локальный обжим заготовок с покрытием не должен превышать 10 %. Для профилирования перфорированных заготовок и заготовок с покрытием следует предусматривать конический участок в области замыкания калибра.

При формообразовании профилей с рифтами, последние следует распределять по переходам и/или применять натяг кромки во избежание потери устойчивости элементов и «развала» профиля.

5. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Виды применяемого формообразующего и вспомогательного оборудования при производстве профильных листовых деталей приведены в табл. 1.12. Специфика процессов интенсивного формообразования и современные тенденции рынка (см. разд. 1) вносят определенные изменения к подходу разработки оборудования для производства длинномерных профильных деталей, среди которых – требование малого числа клетей, совмещения операций образования сечения и правки или гибки по контуру, а также адаптируемости к условиям автоматизированного производства.

В работе [431] приведена классификация профилегибочного оборудования по различным параметрам. При разработке профилегибочного оборудования для интенсивного формообразования в зависимости от его назначения может быть принята одна из следующих концепций: 1) специализированное; 2) универсальное; 3) модульное. Специализированное оборудование предназначено для изготовления одного типоразмера профиля или группы однотипных профилей и практически лишено возможности регулировки. Универсальное оборудование рассчитано на широкую номенклатуру профилей, имеет значительные возможности регулировок. Модульное оборудование позволяет расширить технологические возможности по сравнению с универсальным оборудованием за счет изменения (обычно увеличения числа клетей для формообразования сложных многоэлементных профилей). Разработчики оборудования для производства гнутых профилей поставляют на рынок универсальные профилегибочные станки (до 70 – 80%) и модульные станки. Специализированные станки составляют не более 5 %.

5.1. Разработка и расчет профилегибочного оборудования

Первым профилегибочным станком для реализации стесненного изгиба (см. табл. 1.17) был станок ГПС-200 (рис. 5.1), для которого выполнены расчеты энергосиловых характеристик, составлена карта технического уровня, разработано обоснование применения правильного устройства [386], а также выполнены другие работы по подготовке технического задания на станок, разработка которого финансировалась Министерством авиационной промышленности [395].

Станок ГПС-200 (табл. 5.1) был поставлен на Саратовский авиационный завод в 1986 г. Рабочие валы станка крепились в подшипниках скольжения, клетки были раздельными, причем клеть предварительного формообразования с вертикальными валами была снабжена обгонной муф-

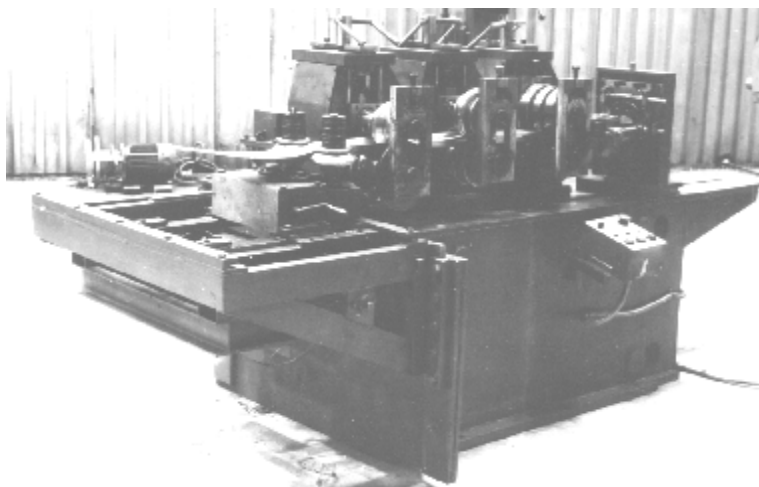


Рис. 5.1. Первый профилегибочный станок ГПС-200, предназначенный для реализации СИ

той для подачи заготовки и последующего отключения для обеспечения режима волочения заготовки при поштучном профилировании.

Несколько усовершенствованный станок ГПС-200М [432] со сдвоенной клетью был поставлен в 1987 г. на Смоленский авиационный завод (рис. 5.2, табл. 5.1). Станок состоит из станины 1, клетки предварительного формообразования 2, сдвоенной профилирующей клетки 3, одиночной клетки 4, правяльного устройства 5, станции смазки 6 и привода 7.

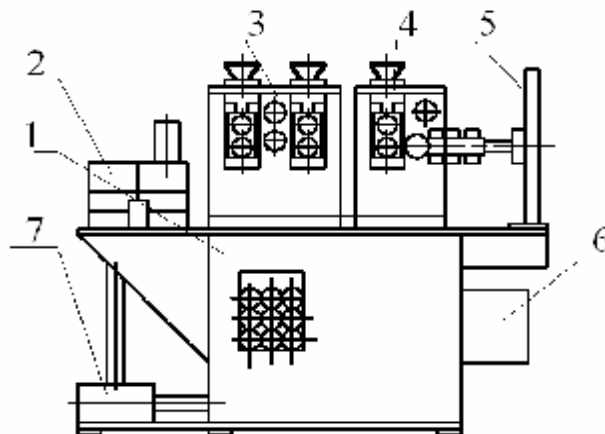


Рис. 5.2 Станок ГПС-200М

Для последующей модели ГПС-200М1 (рис. 5.3) автором были выполнены уточненные расчеты энергосиловых параметров и межклетьевого расстояния, а также построена модель работы правяльного устройства в динамическом режиме, проведены расчеты его параметров [433].

Основными параметрами, подлежащими расчету при проектировании станков моделей ГПС (базовая модель ГПС-200М1), являлись: мощность электродвигателя, диаметры валов и межклетьевое расстояние. При расчетах энергосиловых параметров основывались на рекомендациях и моделях работ [434, 435].

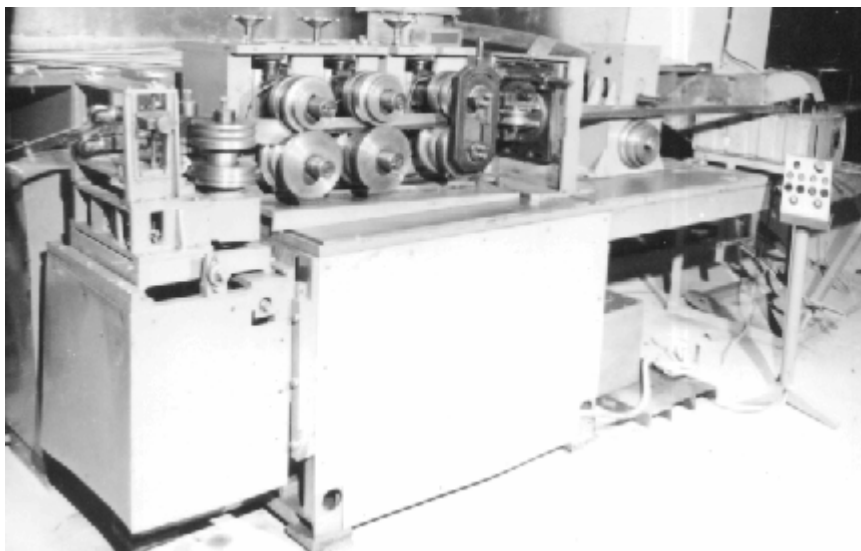


Рис. 5.3. Профилегибочный станок ГПС-200М1 с устройством для съема готового профиля

Мощность двигателя N рассчитывали, исходя из значений действующих максимальных моментов на валах (см. соотношения (4.21, 4.36) и графики на рис.4.82) по формуле:

$$N = 1,4 \frac{M}{R_p} v = 7,0 \text{ кВт}, \quad (5.1)$$

где v – скорость профилирования.

Диаметры валов выбирались, исходя из условия обеспечения точности сечения профиля по седьмому качеству:

$$D = 2\sqrt[4]{\frac{P_N l^3}{192pEd}} = 50_{мм}, \quad (5.2)$$

где P_N – распирающее усилие (максимальное) на окончательном переходе (формула (4.37) и графики на рис. 4.82); l – длина валов; δ – максимальный прогиб вала.

Формула (5.2) получена на основе расчетной схемы для одностороннего жесткого защемления вала со свободно опертым другим концом (замыкающая серьга) при сосредоточенной нагрузке в середине вала (рис. 5.4).

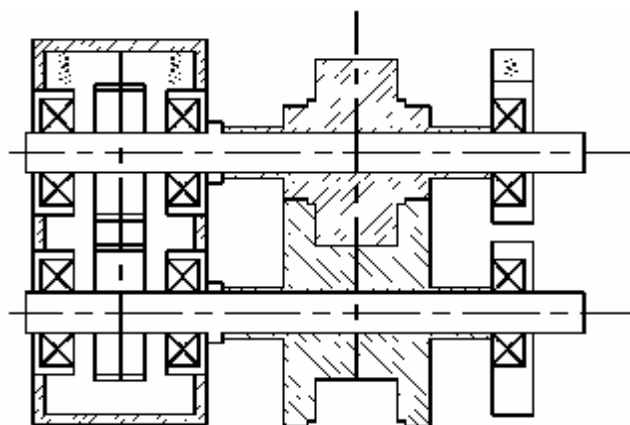


Рис. 5.4 Расчетная схема для определения параметров клетки станка

Таблица 5.1

Характеристики гибочно-прокатных станков ГПС

Наименование параметра станка и его размерность	Модели гибочно-прокатных станков						
	ЭГПС-1(350)	ГПС-200	ГПС-200М	ГПС-200М1/ ГПС-200М11	ГПС-300 и его модификации	ГПС-500 и его модификации	ГПС- 500М12У
Диаметр валов, мм	41	65	55	50	50/65	50/65	65/90
*Диаметр роликов, мм	200	200	200	200	220	250	300
*Ширина роликов, мм	200	200	200	200	300	500	500
*Глубина формовки, мм	50	50	50	50	50	90	90
*Толщина заготовки, мм	2,5	2,5	2,5	2,5	3,5	4	5
Регулировка валов:							
• нижнего, мм	–	20	20	20	20	20	20
• верхнего, мм	50	70	70	70	70	90	110
Скорость формовки, м/мин	4	6	6	8/20	12	12	12
Межклетьеовое расст., мм	350	350	220	220	400	400	400
Межосевое расстояние, мм		95-180	220- 230	95-180	95-180	95-220	95-240
Мощность привода, кВт	3,5	7,5	6,6	7,5/11,1	7,5/–	–	**
Габариты станка, мм	–	1875х 1800х 1350	1875х 1100х 1350	1875х 1100х 1350	–	–	**
Масса, кг	~500	2310	~2000	1960			**
* – максимальные значения ; ** – модульная конструкция							

Межклетьеовое расстояние определяли на основе работ [412, 314] (см. формулу (4.11)), в которых представлен частный случай модели зоны плавного перехода (3.56) (изотропный, идеально пластичный материал заготовки без учета соотношения диаметров роликов). Исходя из того, что для номенклатуры

типовых профилей (табл. 4.22, рис. 4.79) ширина подгибаемых элементов не превышает 30 толщин материала при $R = 2r$, получаем:

$$L_M = \sqrt{\frac{8b^3q_n}{3S_0(2-r/R)}} = 219_{мм} \quad (5.3)$$

Результаты расчетов опубликованы в нашей работе [425], где резюмированы исследования НДС в угловой зоне и в полках, даны процедуры подсчета работы деформирования, силовых параметров и рекомендации по проектированию оборудования. Результаты приведенных расчетов позволили снизить массу нового станка ГПС-200М11 на 350 кг (17%) и уменьшить его габариты в плане на 40 % по сравнению с базовым станком ГПС-200 (см. табл. 5.1).

Последующие модификации станков подвергались в той или иной степени модернизации для улучшения функциональных, эксплуатационных и эргономических характеристик. На рис. 5.5 представлен станок ГПС-300М6 в составе автоматизированной линии.

Гибочно-прокатные станки семейства ГПС (ГПС-300М6, ГПС-350М6, ГПС-350М8, ГПС-500М6, ГПС-500М8, ГПС-500М12) имеют консольное закрепление валов с замыканием торцов серьгой (рис. 4.5 и 4.6).

Преимущество консольного закрепления валов станков ГПС состоит в простоте, удобстве обслуживания и настройки валкового инструмента и вспомогательной оснастки, установленной в межклетьевом пространстве; малом времени перевалковки.

Отрицательным является то, что при установке роликов посередине вала из-за неравных условий закрепления его концов действие распирающей силы P_N вызывает перекос, следствием чего является различие зазоров между посадочными элементами формирующих роликов.

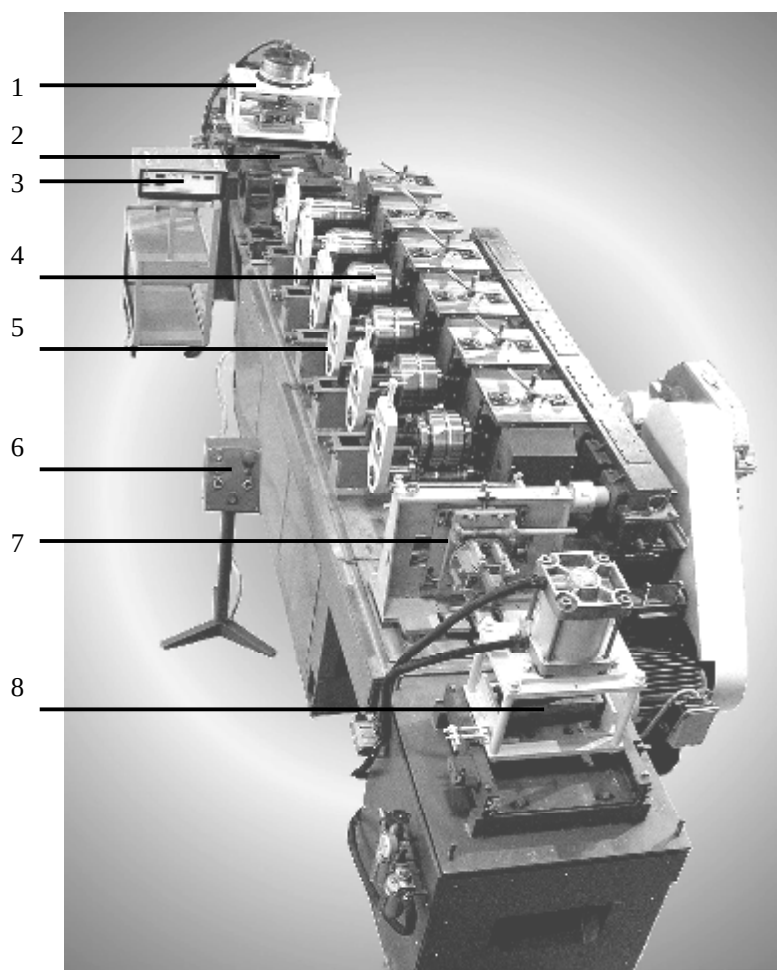


Рис.5.5. Гибочно-прокатный станок ГПС-300М6: 1 – перфоратор; 2 – направляющее устройство; 3 – отсчитывающее устройство; 4 – клеть станка; 5 – серьга замыкающая; 6 – пульт управления; 7 – правильное устройство; 8 – летучий штамп отрезной

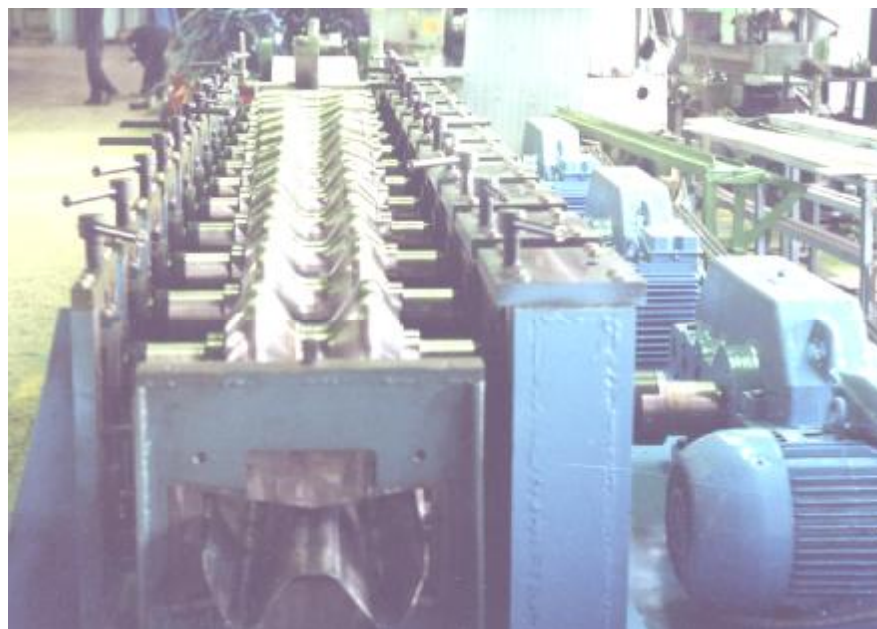


Рис. 5. 6. Станок ГПС-500М12 модульной конструкции для производства профиля дорожного ограждения, поставленный в г. Пензу

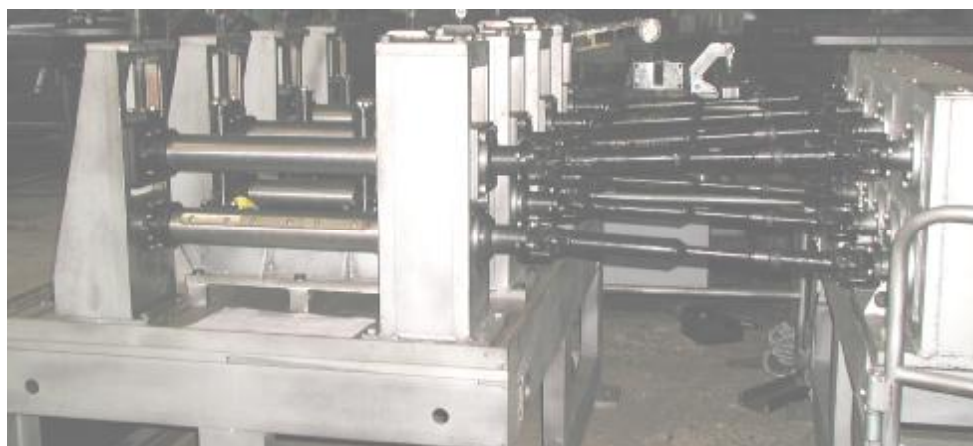


Рис. 5.7. Модуль станка ГПС-500х с клетью двухстоечной конструкции и карданным приводом (ноябрь 2004 года)

Модульные станки (рис. 5.6 и 5.7) применяют преимущественно для производства эксклюзивных профилей, требующих более 8 переходов, или профилей с толщиной стенок более 3 мм. В этом случае большое число переходов диктуется необходимостью уменьшения контактных напряжений между заготовкой и роликом с целью увеличения срока службы оснастки или предотвращения повреждения покрытия (при его наличии) заготовки. Двухстоечные клетки (рис. 5.7) применяют при больших распирающих усилиях в случае формообразования профилей с необходимостью локальной раскатки или для производства профилей со значительной толщиной стенок, когда частые перевалки не требуются.

Конструкция гибочно-прокатных станков (станов) специального назначения, рассчитанная на узкий сортамент профилей, отличается простой в изготов-

лении, малыми габаритами, малой металлоемкостью и себестоимостью. Автор являлся руководителем разработки шестиклетьевого станка на базе разработанного ранее четырехклетьевого экспериментального станка СФПЭ-1 [436] для изготовления планок и ламелей жалюзи по заказу ООО «Милана» (г. Санкт-Петербург).

Для реализации технологий интенсивного формообразования разработано более 20 модификаций профилировочных станков, которые работают в настоящее время на более, чем 100 предприятиях РФ, а также в Узбекистане, Казахстане, Грузии, Белоруссии и на Украине. Только в авиастроении технология интенсивного формообразования и профилегибочное оборудование внедрены на 13 предприятиях. На станок ГПС получен патент [437], в отличительную часть которого включена модель протяженности зоны плавного перехода для назначения межклетьевого расстояния станка, а также правильное устройство определенного функционального назначения, для которого выполнены расчеты конструктивных параметров.

5.2. Динамический режим работы правильного устройства и расчет его параметров

Анализ дефектов профилей (см. п.1.4), схем и способов формообразования (см. п. 1.6), причин возникновения продольной кривизны (см. п. 3.12) и способов реализации аксиального поджатия (см. п. 4.13) позволили сформулировать требования к правильному устройству [386] и сформировать концепцию конструктивного воплощения его предполагаемых функций [433].

Для обеспечения отсутствия скрутки, условия прямолинейности профиля (3.165), принимая во внимание ограничения в случае изменения угла захода его в калибр, а также необходимость создания аксиального сжатия, рассмотрим возможность изменения условий формообразования профиля за счет воздействия на него по выходу из клетки окончательного формообразования (см. рис. 3.49). Такое воздействие можно осуществить с помощью специального правильного устройства [386], которое:

- имеет возможность спрямляющего воздействия на профиль;
- обеспечивает возможность изменения угла выхода профиля из калибра окончательного формообразования, включая скрутку;
- обеспечивает аксиальное поджатие в очаге деформации с целью интенсификации процесса;
- имеет возможность настройки в вертикальной и горизонтальной плоскости, а также вдоль оси профилирования.

Правильное устройство имеет три степени свободы регулировок и одну степень свободы монтажа (вдоль направления движения профиля).

Специальное правильное устройство [386] (рис. 5.8 и 5.9) содержит станину 1, на которой установлена плита 2 с возможностью регулировки в вертикальной плоскости. Плита 2 несет на себе плиту 3, имеющую регулировку в горизонтальной плоскости. На плите установлена обойма 4, имеющая возможность поворота в плоскости, перпендикулярной оси правки. На обойме 4 симметрично установлены две штанги 5, имеющие возможность поворота в вер-

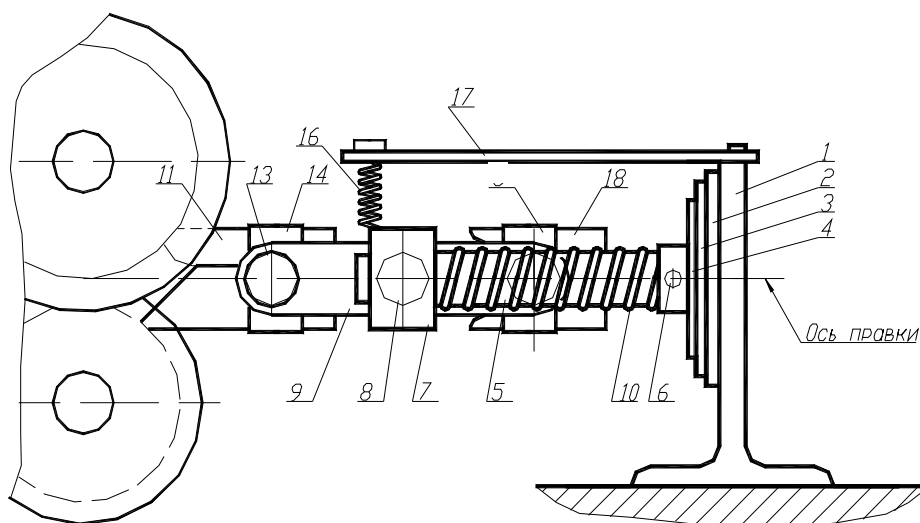


Рис. 5.8. Схема специального правильного устройства станка

тикальной плоскости относительно шарниров 6. На штангах 5 установлены ползушки 7, несущие на себе шарниры 8 коромысел 9.¹¹ Штанги 5 дополнительно несут на себе пружины 10, обеспечивающие работу устройства в динамическом и квазистатическом режимах.

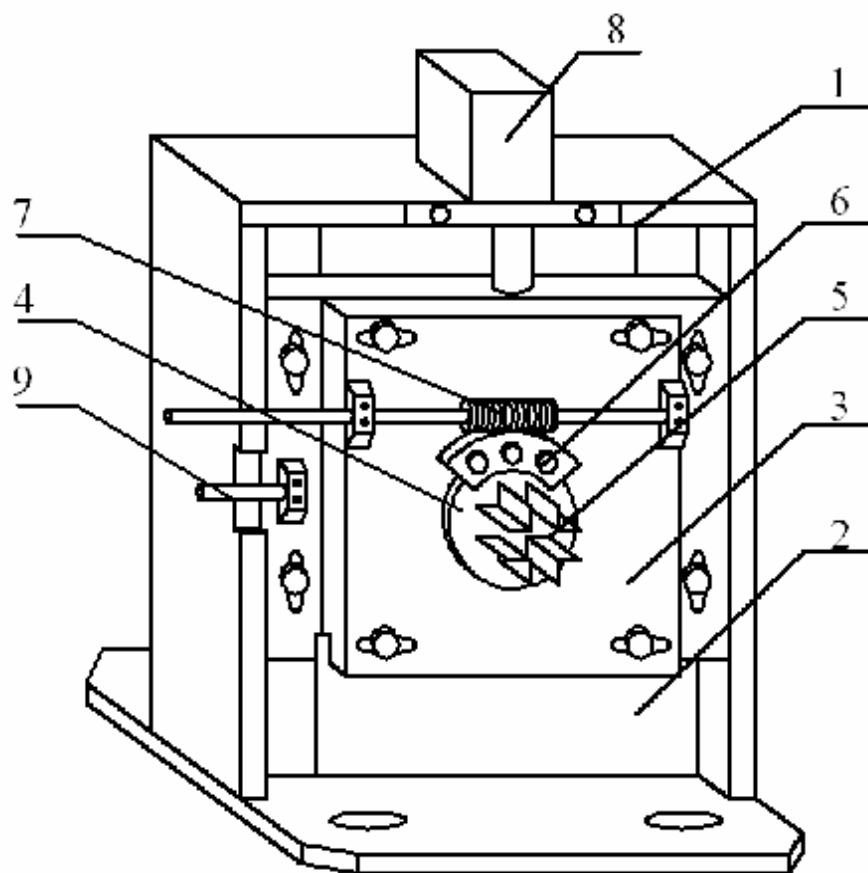


Рис. 5.9. Правильное устройство станка ГПС: 1-корпус; 2-плита песущая; 3-плита; 4-обойма; 5-альтернативная правильная ось; 6- поворотный сектор; 7-червяк; 8-регулирующий винт несущей плиты; 9-регулирующий винт плиты

Коромысла 9 несут симметрично расположенные относительно шарниров 8 правильные калибры 11 и 12, имеющие возможность ограниченного поворота вертикальной плоскости относительно шарниров 13, установленных на корпусах 14 и 15 калибров 11 и 12. В правильных калибров используются инструментальные фильеры. Для уравнивания правильного блока в вертикальной плоскости и обеспечения возвращающей силы имеются пружины 16, установленные между кронштейнами 17 и штангами 5.

Задача состоит в определении конструктивных параметров правильного устройства путем анализов режима его работы в момент захода профиля в правильное устройство (динамический режим), поскольку, именно в этом случае силовые характеристики процесса достигают своих максимальных значений.

В качестве конструктивных элементов берутся определяющие параметры устройства: длина коромысла 9, длина фильер 11, характеристики удерживающих пружин 10 и 16, а также параметры трансверсальных сечений коромысла 9 и стойки 1 (рис. 5.8).

Рассмотрим процесс стабилизации правки от момента входа конца профиля в первую фильеру до момента достижения стабильного режима. Профиль, выходящий из пары роликов окончательного формообразования, имеет некоторую кривизну $\rho = R_0$ (см. формулу (3.165)) вследствие неравномерности распределения деформаций по его сечению. При заходе в правильный калибр, размеры ручья которого совпадают с размерами профиля, происходит спрямление искривленного участка профиля. При этом спрямляющееся усилие со стороны фильеры равно P . В начальный момент фильера поворачивается по отношению к профилю таким образом, чтобы спрямлять его по хорде. Следовательно, фильера имеет в момент прохождения через нее профиля (вторая фильера пока еще не пришла в контакт с профилем) некоторый угол наклона α по отношению к оси профилирования. Тогда, если обозначить аксиальное усилие, действующее на очаг деформации в паре роликов окончательного формообразования, Q , воздействие вдоль оси фильеры P_a определяется как:

$$P_a = \frac{Q}{\cos \alpha}. \quad (5.4)$$

Спрявление профиля эквивалентно обратного процессу типа прогиба профиля одновременным воздействием поперечной и продольной силами. В этом случае дифференциальное уравнение для профиля можно записать в виде:

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{P \cdot x}{2} - P_a y, \quad (5.5)$$

где E – модуль Юнга; J – момент инерции поперечного сечения профиля; x , y – декартовы координаты.

Вводя обозначение $x^2 = \frac{P_a}{EJ}$, преобразуем уравнение (5.5) к виду:

$$y + x^2 y = -\frac{2P}{4EJ} x. \quad (5.6)$$

¹¹ Идея качающихся фильер принадлежит В.А. Марковцеву и Г.В. Проскурякову

Неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка (5.6) решается методом вариации постоянных, поскольку решение однородного уравнения хорошо известно. После получения интегрирования получаем:

$$y = C_1 \cos x_a x + C_2 \sin x_a x - \frac{P_x}{2P_a}, \quad (5.7)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Граничные условия для решения (44) следуют из того факта, что концы спрямляемой дуги не перемещаются вдоль оси ординат, а в средней части сечение профиля не поворачивается. Тогда максимальный прогиб профиля определяется выражением:

$$y_{mas} = \frac{x^2}{x_0^2} \left(\frac{1}{2x} \operatorname{tg} \frac{x_a l}{2} - \frac{l}{4} \right), \quad (5.8)$$

где $x_0^2 = \frac{P}{EJ}$.

Полученная формула является асимптотически корректной, поскольку при отсутствии аксиального воздействия ($P_a = 0$) величина изгибающего момента $M_{изг}$, полученная с использованием решения (5.8), в асимптотике дает величину изгибающего момента при изгибе поперечной сосредоточенной силой:

$$M_{изг} = \frac{Pl}{4} \lim_{\frac{x l}{2}} \frac{\operatorname{tg} \frac{x l}{2}}{\frac{x l}{2}} = \frac{Pl}{4}.$$

Выразим теперь величину аксиального усилия через величину максимального прогиба. С использованием (45) получим трансцендентное уравнение для определения аксиального усилия:

$$2y_{max} f = \frac{\operatorname{tg} \left(x_a \frac{l}{2} \right)}{2 x_a} - \frac{l}{4}, \quad (5.9)$$

где f – коэффициент трения между фильерой и профилем.

При выводе формулы (5.9) мы исходили из предположения жесткого крепления фильер. В случае использования подпружиненных фильер, аксиальное усилие находится из известного соотношения Амонтона – Кулона непосредственно, поскольку сила подпружинивания известна.

Полученные из уравнения (5.9) значения P_a должны использоваться посредством соотношения (5.4) при анализе напряженно-деформированного состояния в очаге деформации окончательного формообразо-

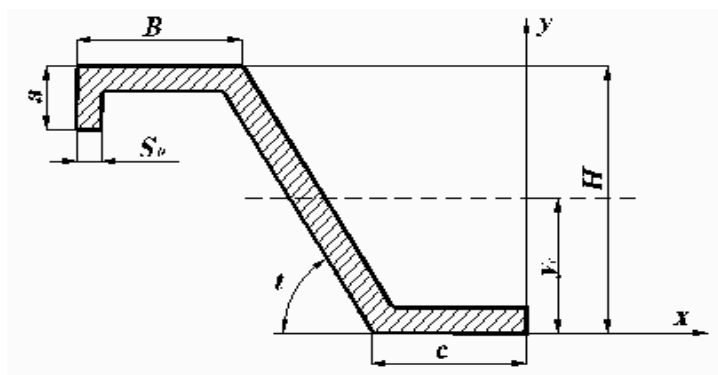


Рис. 5.10. Сечение профиля, подверженного правке

вания.

Для решения трансцендентного уравнения (5.9) относительно необходимо знать $y_{\max}$ и J . Если известна кривизна профиля, выходящего из пары роликов окончательного перехода, то из геометрического рассмотрения процесса правки следует, что:

$$y_{\max} \approx \frac{1}{8} \frac{l^2}{R}, \quad (5.10)$$

где l – длина фильеры.

Для определения момента инерции поступим следующим образом. Рассмотрим половину поперечного сечения симметричного корытообразного профиля с отбортовками (рис. 5.10) и определим сначала центр тяжести данного профиля, а затем – момент инерции относительно линии, проходящей через центр тяжести параллельно оси X . Для определения центра тяжести y_c воспользуемся формулой из теории двойного интеграла [438]:

$$y_c = \frac{\iint_{(F)} y dF}{\iint_{(F)} dF}, \quad (5.11)$$

где F – площадь поперечного сечения профиля.

Вычислять другую координату центра тяжести нет необходимости ввиду симметричности профиля. При вычислении интегралов в формуле (48) площадь сечения разбивается на ряд четырехугольников, стороны которых описываются прямыми, поэтому расстановка пределов интегрирования в интегралах не представляет большой сложности и в окончательном виде ординату центра тяжести запишем так:

$$y_c = \frac{S_0 \left(\frac{H^2}{2 \sin j} + \frac{2H^2}{tg j} + eH + aH + \frac{a^2}{2} \right) + S_0^2 \left(\frac{c}{2} - \frac{3H}{2tg j} - \frac{b}{2} - \frac{H}{\sin j} - H \right) + S_0^3 \left(\frac{2}{3tg j} + \frac{1}{2} \right)}{S_0 \left(a + b + c + \frac{H}{\sin j} \right) + S_0^2 \left(\frac{1}{tg j} - \frac{2}{\sin j} - 1 \right)}, \quad (5.12)$$

где S_0 – толщина исходного листа; H – высота профиля; φ – угол, определяющий взаимное положение задней и боковой стенок; b – ширина полки; a – высота отбортовки; c – половина ширины задней стенки.

Корректность формулы (5.12) может быть подтверждена частным примером. Так, для симметричного корытообразного профиля, имеющего прямой угол и ширину стенки, равную удвоенной ширине полки, координата центра тяжести равна, очевидно, половине высоты профиля. Действительно, при $\varphi = \pi/2$, $a = S_0$, и $b = c$ из формулы (5.12) получаем: $y_c = \frac{H}{2}$.

Для определения момента инерции будем придерживаться следующей процедуры. Найдем сначала момент инерции относительно оси X , а затем уже – относительно оси, проходящей через центр тяжести параллельно оси X . Запишем выражение для J_x в виде:

$$J_x = \iint_{(F)} y^2 dF. \quad (5.13)$$

Поступая так же, как и при вычислении координаты центра тяжести, учитывая свойство аддитивности момента инерции, получим на основании формулы (5.13) выражение для вычисления J_x :

$$J_x = S_0^4 \left(\frac{1}{2tgj} - \frac{2}{3sinj} - \frac{1}{3} \right) + S_0^2 \left(\frac{c}{3} + \frac{b}{3} + \frac{H}{sinj} - \frac{2H}{3tgj} + H \right) + S_0^2 \left(\frac{H^2}{2tgj} - \frac{H^2}{sinj} - bH - H^2 \right) + S_0 \left(\frac{H^3}{3sinj} + H^2b + H^2a + \frac{a^3}{3} - Ha \right). \quad (5.14)$$

В правильности формулы (5.14) можно убедиться, проводя анализ размерности и решая частный пример. Как известно, момент инерции прямоугольника относительно его основания равен произведению одной третьей основания на куб высоты. Сведя профиль (рис. 5.10) к прямоугольнику ($\varphi = \pi/2$, $a = S_0$, $b = S_0$, $c = S_0$), получаем из формулы (5.14)

$$J_x = \frac{S_0 H^3}{3}.$$

Далее, момент инерции относительно линии, проходящей через центр, тяжести параллельно оси X легко определяется по формуле Штейнера [378]:

$$J = J_x - y_c^2 F. \quad (5.15)$$

Таким образом, с помощью формул (5.15), (5.10), (5.9) получаем значение аксиального усилия, возникающего при правке.

Рассмотрим далее усилия, возникающие в поперечном направлении при динамическом режиме работы. Для этого получим, сначала необходимые геометрические соотношения из условия захода профиля во вторую фильеру (рис. 5.11):

$$2l_0 = d \sin b; \quad (5.16)$$

$$l = 2r \operatorname{ctg} q; \quad (5.17)$$

$$d = 2\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \cos(q - b), \quad (5.18)$$

где λ_0 – отклонение центра коромысла от оси профилирования; d – расстояние между центрами фильер; β – угол между осью профилирования и прямой, соединяющей центр первой фильеры с центром кривизны профиля.

Исключая из системы уравнений (5.16) – (5.18) величины θ и β , получим величину отклонения:

$$l_0 = \frac{\frac{l}{r^2} + \sqrt{\frac{4l^2}{(dr)^2} + \left(\frac{2}{d}\right)^2} - \frac{4}{r^2}}{2 \left[\left(\frac{l}{dr}\right)^2 + \left(\frac{2}{d}\right)^2 \right]}. \quad (5.19)$$

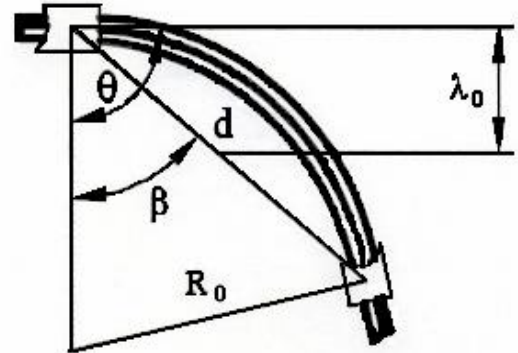
Очевидно, отклонение η точки профиля, находящийся непосредственно перед входом во вторую фильеру, будет вычисляться следующим образом:

$$h = 2l_0 - \frac{2l_0 l}{d} \sqrt{1 - \frac{4l_0^2}{d^2}}. \quad (5.20)$$

Формулы (5.19) и (5.20) определяют отклонение профиля от оси профилирования в зависимости от кривизны профиля ρ и характеристик правильного устройства l и d . В случаях, когда выполняется условие $d > 4H$, $d - l < H$ при радиусе кривизны профиля более $20H$ можно пользоваться более простым соотношением:

$$h = \frac{1}{4} \frac{H^2}{r}.$$

Приведение профиля к прямолинейному положению осуществляется за счет воздействия вертикальных пружин. Данный процесс можно смоделировать, если представить изогнутый профиль подверженным действию возвращающего усилия P_b , приложенного к средней точке коромысла, через посредство правильных фильер.



Используя пример консольной балки с шарнирным креплением одного из концов [378], выразим возвращающее усилие P_b через геометрические параметры процесса, используя соотношение (5.20):

Рис. 5.11. Геометрические параметры при правке профиля на выходе станка

$$2l_0 - \frac{2l_0 l}{d} \sqrt{1 - \frac{4l_0^2}{d^2}} = \frac{P_b \cdot d^3}{3EJ}, \quad (5.21)$$

где J – определяется формулой (5.15).

Заметим однако, что существуют два ограничения на величину P_b . Во-первых, для спрямления профиля необходимо, чтобы выполнялось допущение о принятом типе закрепления профиля, то есть должно выполняться условие:

$$2l_0 P_a > P_b d \sqrt{1 - \frac{4l_0^2}{d^2}}. \quad (5.22)$$

Физически неравенство (5.22) означает исключение проскальзывания между профилем и фильерой в отсутствие аксиального проталкивающего усилия со стороны роликов.

Второе условие является еще более существенным с физической точки зрения, поскольку при правке недопустима потеря устойчивости профиля в очаге деформации.

Требование недопустимости потери устойчивости профиля под действием вертикальных пружин может быть сформулировано в терминах действующих моментов:

$$2 \int_{\left(\frac{F}{2}\right)} s_s \times y \times dF > \left(D + \frac{d}{2} \sqrt{1 - \frac{4 l_0^2}{d^2}} \right) P_b, \quad (5.23)$$

где Δ – расстояние от осевой плоскости валов пары роликов окончательного формообразования до середины первой фильеры при сжатых до упора горизонтальных пружинах.

Неравенство (5.23) выражает условие, того, что момент возвращающего усилия не должен превосходить момент трения пластического шарнира во избежание потери устойчивости профиля в вертикальной плоскости. Условие (5.23) практически всегда выполняется, поскольку влияние вертикальных пружин не является определяющим.

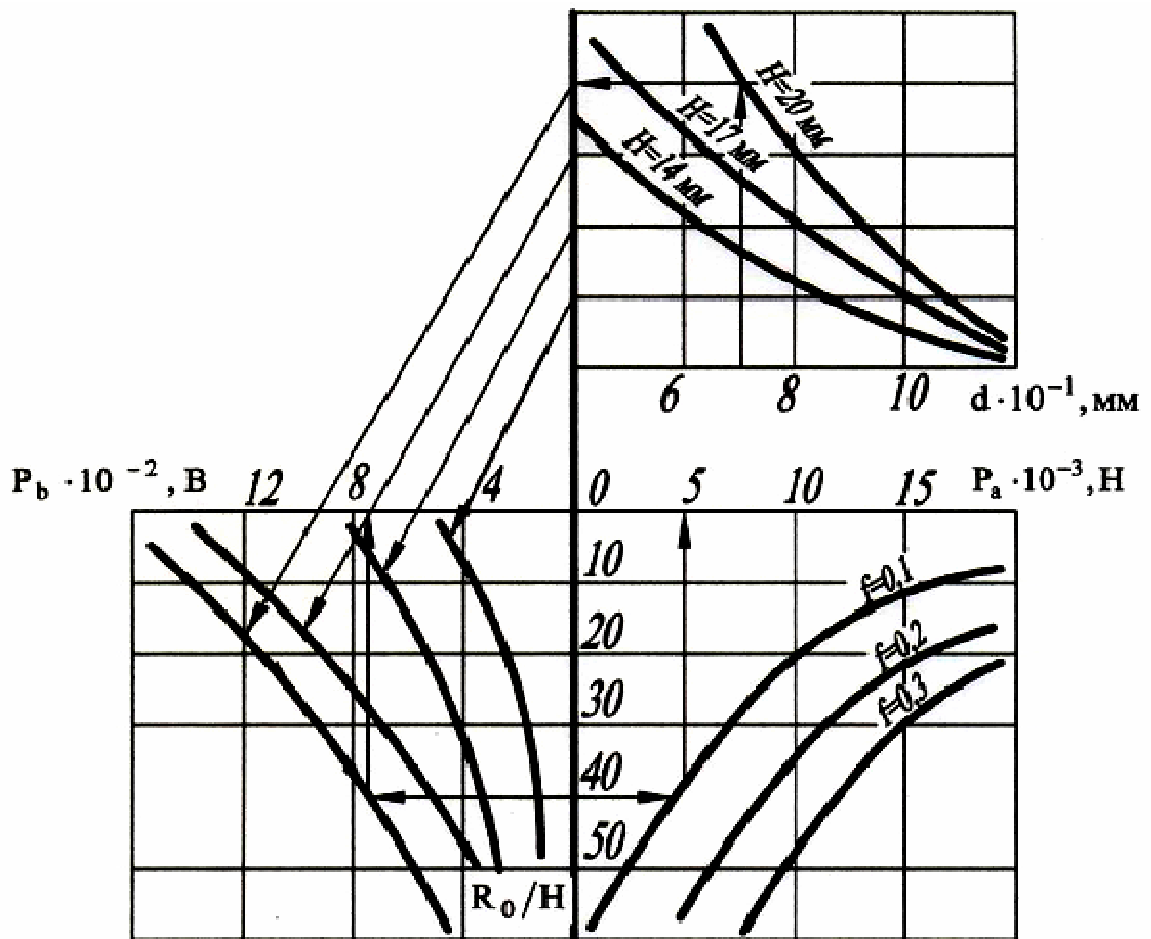


Рис. 5.12. Номограмма для определения аксиального и возвращающего усилий

Уравнение (5.21) дает возможность получить значение усилия, действующего на коромысло при динамическом режиме, а неравенство (5.22) лишь устанавливает ограничения на область его значений. Входящие в соотношения (5.21) – (5.22) величины d и l выбираются из следующих соображений практического характера. Длина коромысла берется равной $6H$, так как именно такая длина коромысла дает возможность захода профиля во вторую фильеру без до-

полнительных ловителей дает удовлетворительные результаты правки. Длина фильер берется равной $(3 \div 4)H$ из расчета спрямляющего воздействия на профиль с учетом заходной части.

На основе построенной в соответствии с формулами (5.9) и (5.21) номограммы (рис. 5.12) можно рассчитать параметры горизонтальных и вертикальных пружин согласно методике работы [439], а параметры поперечного сечения коромысла и вертикальной стойки станины можно выбрать в соответствии с работой [433]. Параметры правильного устройства должны выбираться на основе вышеприведенного рассмотрения в зависимости от габаритов профиля, толщины и механических свойств исходного материала: устройство № 1 применяется для правки профилей с $J = 1500 - 3000 \text{ мм}^4$, а устройство № 2 – для профилей с $J = 3000 - 6000 \text{ мм}^4$ (табл. 5.12) [433]

Для создания значительного аксиального усилия устанавливаются более мощные горизонтальные пружины, а величина зазора в правильных фильерах реализуется в соответствии с заданными усилиями аксиального поджатия. При изготовлении длинномерных профилей из ленты возможно использование подпружиненных фильер с целью создания требуемого аксиального усилия Q для получения большего утолщения в зоне сгиба. Что касается качества правки, то в том и в другом случае прогиб профиля не превышает 1,5 мм на 1000 мм его длины.

Правка профилей с применением описанного правильного устройства основательно изучена В.А. Марковцевым [7] с точки зрения энергосиловых параметров с помощью тензометрического метода, зарегистрированы переходные характеристики процесса правки, показано соответствие аналитических моделей экспериментальным данным в пределах 15...20 %.

Таблица 5.2

Характеристики конструктивных элементов правильного устройства

Параметры	Устройство	
	№1	№2
1. Длина коромысла, мм	114	80
2. Длина фильеры, мм	96	70
3. Площадь сечения коромысла, мм^2	440	330
4. Площадь сечения плиты мм^2	2050	1440
5. Горизонтальная пружина:		
диаметр проволоки, мм	2	2
диаметр витков, мм	26	30
число витков, мм	21	26
6. Вертикальная пружина:		
диаметр проволоки, мм	2	2
диаметр витков, мм	20	20
число витков	21	25

В работах [440, 441] рассмотрены вопросы устойчивости холодной прокатки в смысле отсутствия разрушения «пластического шарнира» в паре роликов окончательного формообразования перед правильным устройством. На основе воздействия на очаг деформации в настоящее время разрабатывается технология производства профилей с заданной кривизной, причем обнаружено, что предельные радиусы кривизны деталей существенно меньше предельных радиусов для четырехроlikовой прокатки профилей для получения, например, профильных колец [331].

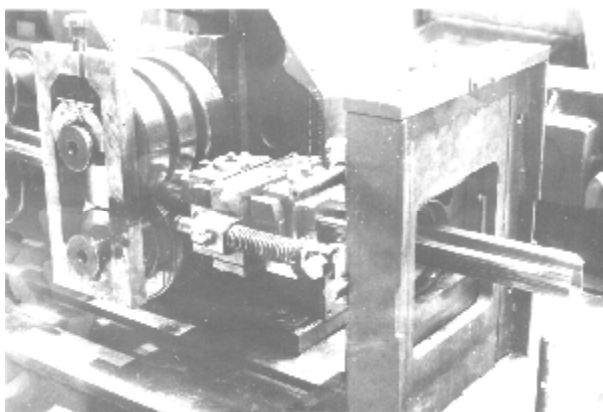


Рис. 5.13. Одна из модификаций правильного устройства ГПС



Рис. 5.14. Правильное устройство для реализации МИД

На рис. 5.13 изображена одна из ранних модификаций правильного устройства, описанного выше. За последние годы правильное устройство претерпело существенные изменения в связи с переходом от СИ к МИД (рис. 5.14). Вместе с совершенствованием станков ГПС [442 – 443, 37] в общей сложности были реализованы в металле более десятка модификаций правильных устройств на основе базовой модели, что можно видеть и на photographиях станков в диссертации (см., например, рис. 5.5 и 5.6).

5.3. Оборудование для производства гофр

Первые работы по созданию технологии производства гофрированных профилей для авиационных конструкций были начаты в 1988 г. под руководством Г.В. Проскурякова. Ведущим конструктором В.Н. Антоновым были

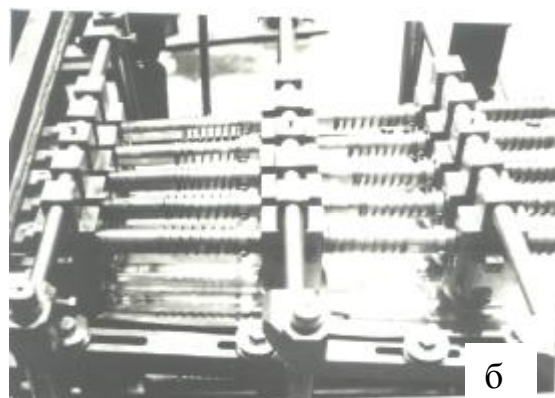
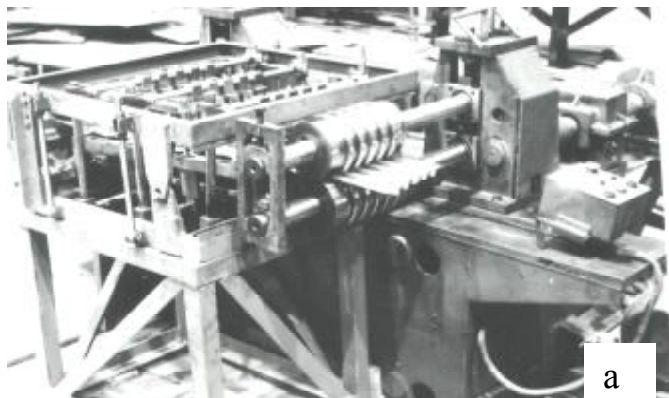


Рис. 5.15. Профилирующий станок: а – общий вид; б – вид сверху

спроектированы и изготовлены экспериментальные установки для производства панелей с элементами двойной толщины [444] и гофрированных профилей [445]. Особенностью профилирующего станка для производства гофрированных панелей, в разработке (расчетах) которого принимал участие автор, было наличие приводной клетки предварительной гибки листа в пологую оболочку, неприводного гофрирующего блока и клетки окончательного формообразования панели стесненным изгибом (см. патент [445]). На экспериментальном профилирующем станке (рис. 5.15) были получены образцы панелей (рис. 5.16), однако дальнейшие работы были свернуты из-за отсутствия финансирования.

Требующее меньших затрат на освоение, оборудование для традиционного профилирования в 90-х годах пользовалось спросом на рынке. В этой связи были разработаны две **первые** автоматизированные линии производства гофрированных профилей [446, 447]. Первая линия внедрена на Самарском металлургическом заводе им. В.И. Ленина. Линия предназначена для изготовления с производительностью 12 м/мин гофрированных панелей из рулонного материала шириной до 1240 мм и толщиной до 1 мм и включает разматыватель рулона, станок прокатки гофр (СПГ-1) и ножницы летучие (ЛН-1). Характеристики разматывателя рулона приведены в табл. 5.3 [448].

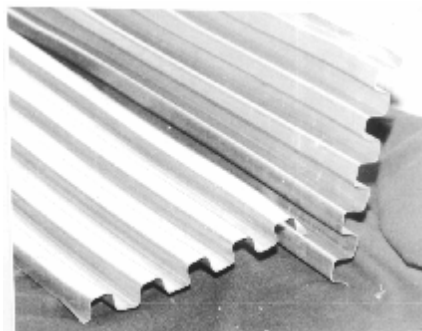


Рис. 5.16. Образцы гофропанелей из алюминиевого сплава

Таблица 5.3

Технические характеристики разматывателя рулона

№	Наименование параметра, его размерность	Значение параметра
1.	Высота рулона над полом, мм	2000
2.	Частота вращения вала, об/мин	12
3.	Внутренний диаметр рулона (мин.), мм	500
4.	Внутренний диаметр рулона (макс.), мм	630
5.	Наружный диаметр рулона (макс.), мм	1500
6.	Ширина рулона, мм	1250±15
7.	Потребляемая мощность, кВт	5,6
8.	Габаритные размеры, мм	2120x2240x2080
9.	Масса, кг	1800

Вал разматывателя – съемный, фиксация рулона – подвижным и неподвижным конусами, регулировка петли ленты – автоматическая (по срабатыванию конечного выключателя).

Характеристики одиннадцатиклетьевого станка прокатки гофр даны в табл. 5.4 [449].

Таблица 5.4

Технические характеристики станка прокатки гофр СПГ-1

№	Наименование параметра, его размерность	Значение параметра
1.	Размеры сечения заготовки, мм	1240x1
2.	Наибольшая глубина формовки, мм	25
3.	Регулировка верхнего вала по вертикали, мм	50
4.	Диаметр рабочего вала, мм	90
5.	Длина рабочей части вала, мм	1300
6.	Межклетьеовое расстояние, мм	200
7.	Скорость профилирования (мах.), м/мин	1250±15
8.	Потребляемая мощность, кВт	7,5
9.	Габаритные размеры, мм	3050x1780x1175
10.	Масса, кг	4250

Технические характеристики летучих ножниц приведены в табл. 5.5 [450].

Таблица 5.5

Технические характеристики ножниц летучих ЛН-1

№	Наименование параметра, его размерность	Значение параметра
1.	Максимальная ширина отрезаемой панели, мм	1000
2.	Ход каретки, мм	500
3.	Скорость перемещения каретки, м/с	0,8
4.	Ход траверсы, мм	15
5.	Скорость перемещения траверсы, м/с	0,5
6.	Угол наклона верхнего ножа, град	3...4
7.	Перекрытие ножей (макс.), мм	2
8.	Точность реза, мм	± 10
9.	Давление воздуха в сети, МПа	от 0,4
10.	Габаритные размеры, мм	1780x1600x1100
11.	Масса, кг	1700

Вторая автоматизированная линия для коммерческой компании «МТЛ» (г. Самара) была предназначена для прокатки глубоких гофр (до 40 мм) из оцинкованных сталей. Линия включала подъемную тележку, разматыватель рулона, правильную машину, летучие ножницы, подающие рольганги, станок прокатки гофр и приемные столы. Станок прокатки гофр имел модульную конструкцию (4 клетки в блоке) и содержал 16 клеток. При разработке технологии использованы технические решения автора [381, 451]. Утепленные ангараы и большинство автозаправочных станций в Поволжском регионе выполнены на основе панелей, изготовленных на указанном оборудовании.

На базе технических решений в указанных автоматизированных линиях к настоящему времени созданы десятки автоматизированных линий по производству гнутых профилей, внедренных на предприятиях РФ. Линии по производ-

ству гофрированных профилей также внедрены в Сызрани, Казани и других городах страны.

5.4. Вспомогательное оборудование процессов профилирования

В процессе выполнения работы использовалось вспомогательное оборудование: раскройные машины (рис. 5.17), рулонницы (рис. 5.18), правильные машины (рис. 5.19), отрезные устройства (рис. 5.20, 5.21 и 5.22).

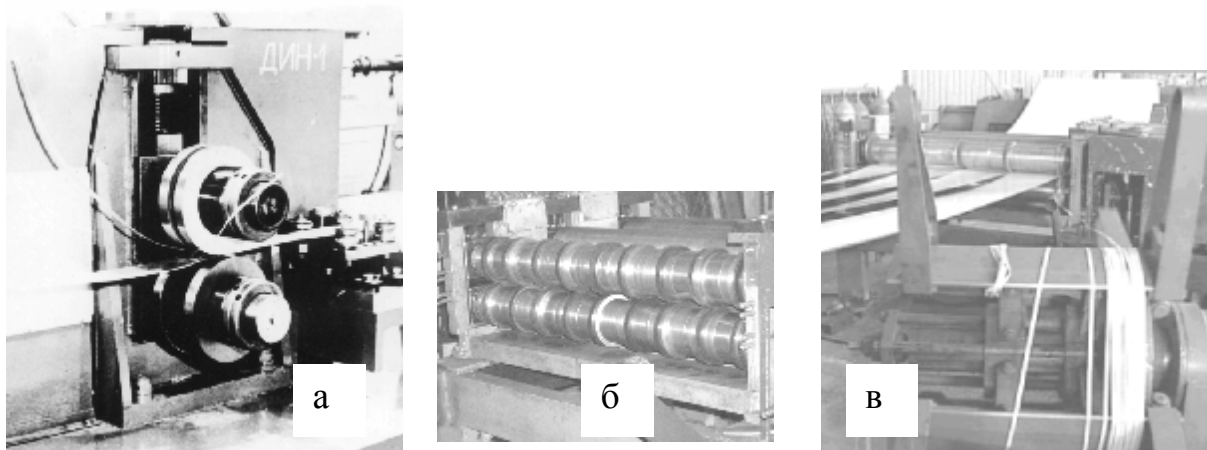


Рис. 5.17. Раскройное оборудование: а – первая модель дисковых ножниц ДИН; б – дисковые ножницы ДИН-1500; в – раскрой и намотка кромок рулона

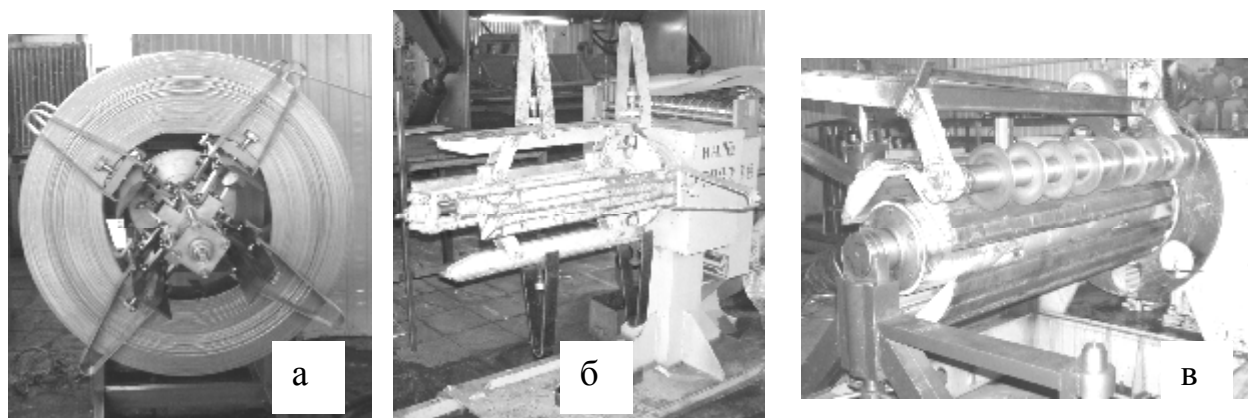


Рис. 5.18. Рулонницы: а, б – подающие; в - приемная

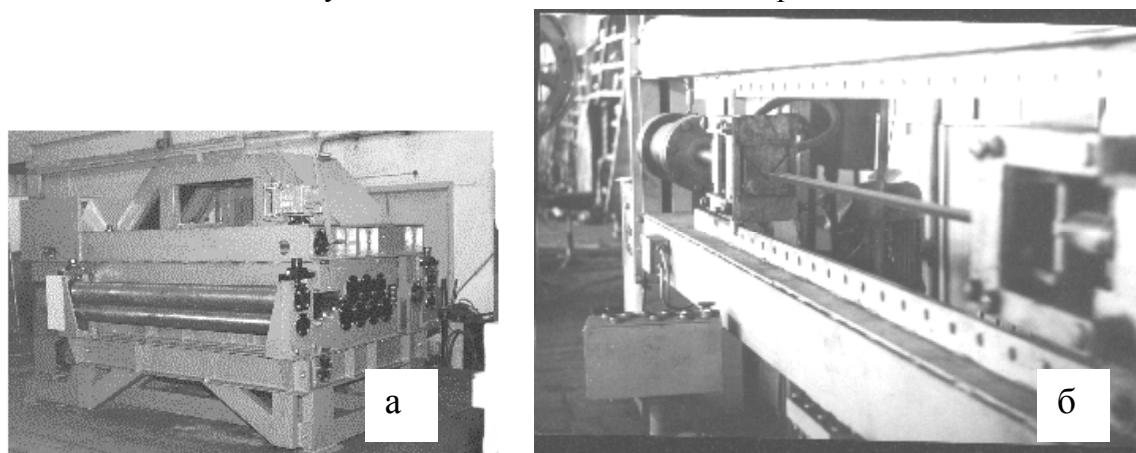


Рис. 5.19. Правильные машины: а – лентоправильная машина; б – устройство правки профилей растяжением УППР

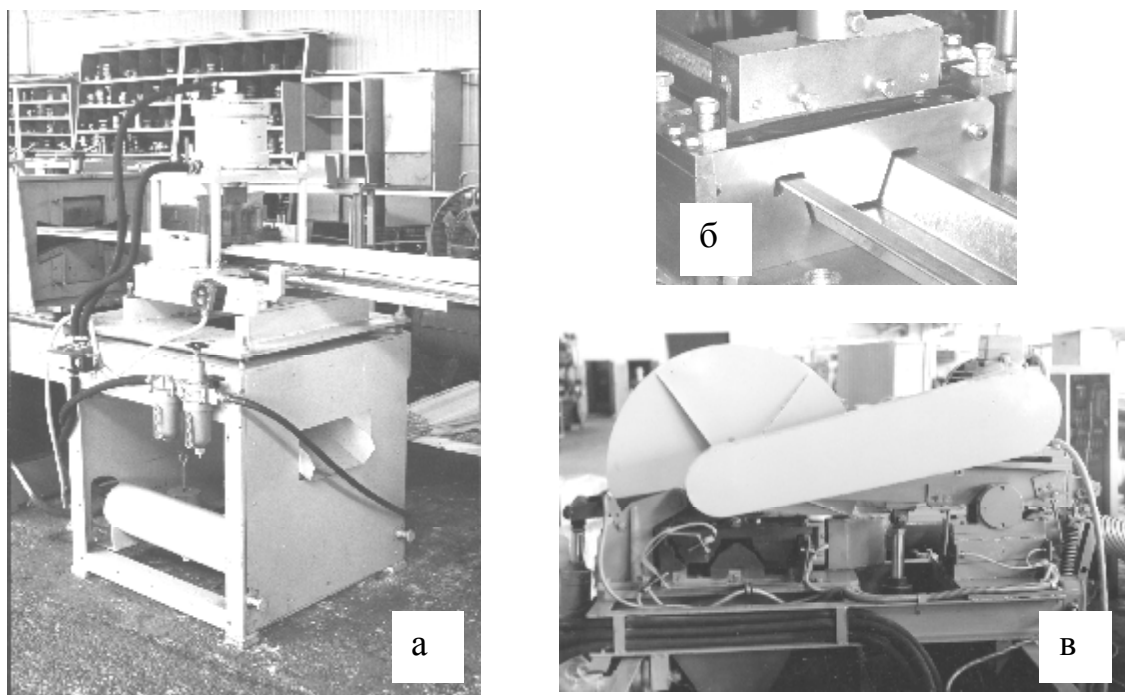


Рис. 5.20. Отрезные устройства: а – пневматическое отрезное устройство; б – матрица и пуансон устройства; в – летучая маятниковая пила

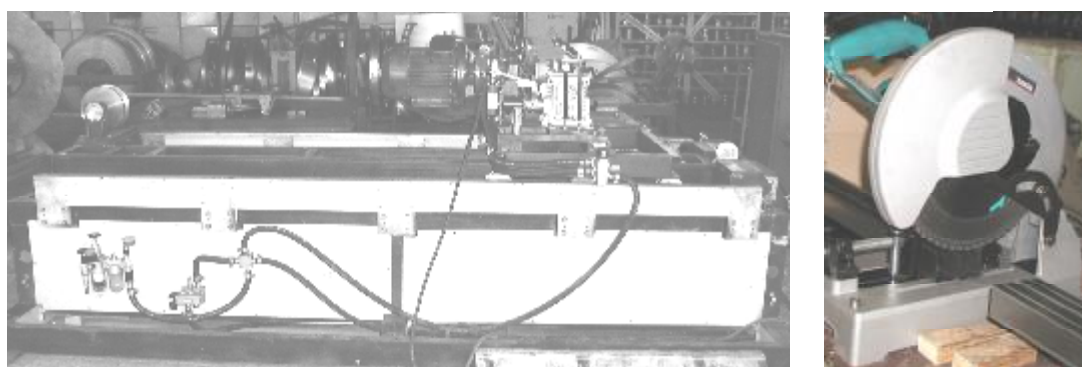


Рис. 5.21. Отрезное устройство с летучей режущей головкой (справа) для автоматизированной линии профилирования

Каждый из видов вспомогательного оборудования имеет ряд модификаций, обусловленных требованиями заказчиков профилегибочного оборудования. К настоящему времени разработано более 70 видов различных устройств, относящихся к основному и вспомогательному оборудованию для производства гнутых профилей. Основное оборудование предназначено преимущественно для реализации интенсивного формообразования гнутых профилей. Вспомогательное оборудование (разматыватели, дисковые ножницы, наматывающие устройства, кромкоотгибатели, правильные машины, перфорирующие пневматические прессы, отрезные устройства и пр.) предназначены для работы в составе автоматических и автоматизированных линий различного класса (легкого, среднего и тяжелого). Класс (или тип) линии устанавливается по типу основного профилирующего оборудования.

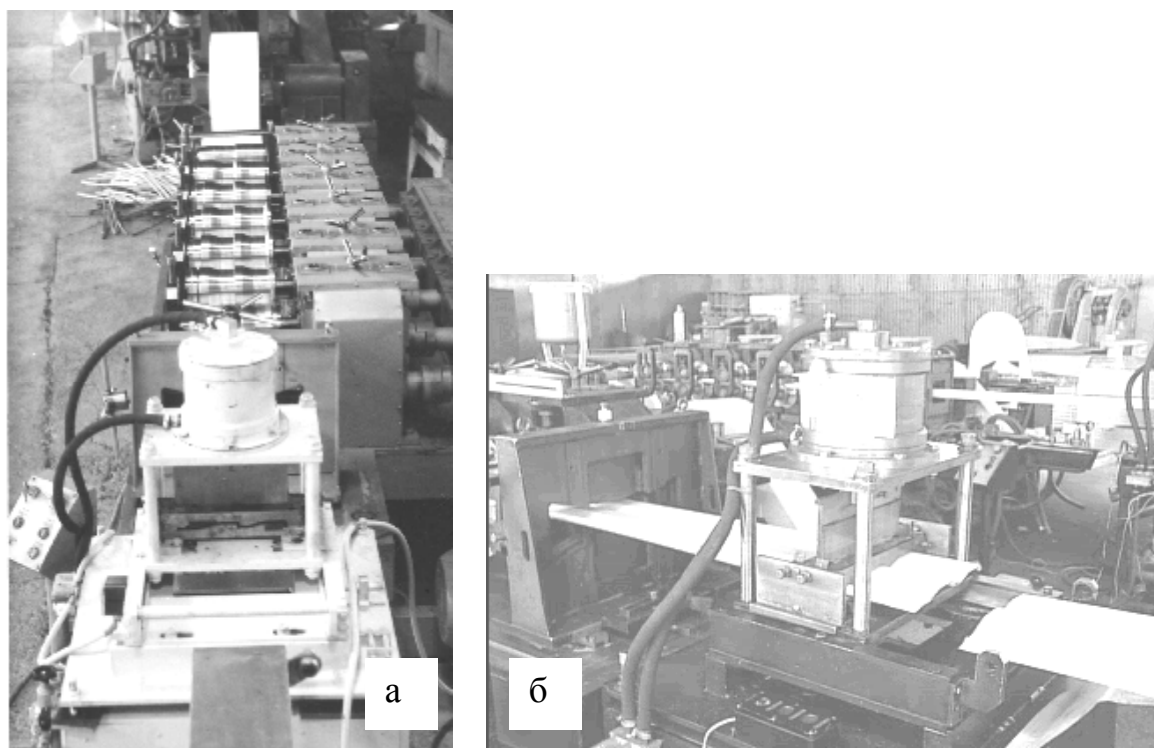


Рис. 5.22. Линия производства профиля типа «сайдинг»:
а – общий вид; б – резка профиля на мерные длины

Авторы книги принимали непосредственное участие в создании основного и вспомогательного оборудования в форме технического обоснования, подготовки технических заданий, выполнения расчетов.

5.5. Оборудование ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ»

В последние пять лет интенсивная разработка основного и вспомогательного оборудования ведется в предприятиях «Спецтехнология» и НПО «ИДМ» (г. Ульяновск). Ниже приводятся технические решения согласно патентам, использованные при разработке оборудования.

Профилегибочный стан ООО «Спецтехнология» защищен патентом (Патент РФ № 50886 (U1), МПК В21D 5/06. Профилегибочный стан / В.А. Литвинов, А.В. Филимонов, Д.П. Зарубин, С.В. Филимонов, В.И. Лапшин. Оpubл. 27.01.2006. Бюл. № 3) и предназначен для реализации метода интенсивного деформирования (рис. 5.23). Формула полезной модели к патенту: «1. Профилегибочный стан, содержащий смонтированные на станине ряд клеток с профилированными валками, приводными от электропривода, и входное направляющее устройство, установленное перед первой клетью и содержащее пластины с пазами и закрепленные в этих пазах регулируемые базовые элементы, при этом первая пара валков и, по крайней мере, одна последующая снабжены выступами, отличающийся тем, что профилегибочный стан снабжен правильным устройством, установленным за последней профилирующей клетью, и выполненным с возможностью смещения оси правки относительно оси профилирования, пультом управления профилегибочным станом, при этом станина профилегибочного стана выполнена, по меньшей мере, из двух секций, включающих каж-

дая, по крайней мере, две профилирующие клетки, и расположенные между ними промежуточные клетки и упомянутый электропривод, причем каждая профилирующая клетка снабжена установленной в станине замыкающей серьгой, смонтированной с одной из сторон клетки и ползунами, верхним и нижним, установленными один над другим с зазором и закрепленными в стойках с одной стороны клетки и на замыкающей серьге с другой стороны клетки, при этом верхний и нижний валы выполнены приводными и установлены в упомянутые ползуны, преимущественно на подшипниках качения, с возможностью их вертикального перемещения вместе с ползунами по стойкам посредством подъемных ходовых винтов, расположенных симметрично относительно корпуса клетки, преимущественно по два, в верхних и нижних ее частях, причем нижние валки каждой пары сопряженных между собой по калибру валков в каждой рабочей клетке профилегибочного стана выполнены разной ширины и снабжены компенсирующими распорными втулками разной ширины, размещенными на нижних валах с обеих сторон от формирующих охватывающих валков таким образом, что вместе с нижними охватывающими валками, образуют постоянный одинаковый размер суммарной размерной цепи от основной оси профиля до установочной базы в каждом калибре каждой клетки профилегибочного стана, а упомянутые пары формирующих валков в каждом калибре каждой клетки профилегибочного стана соединены торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадкой «в замок» по H7/h7 и выполнены с постоянным боковым размером вертикального зазора в калибре каждой клетки упомянутыми деформирующими выступами, а при вертикальном расположении краев профиля ограничены по ширине по торцам выступами.

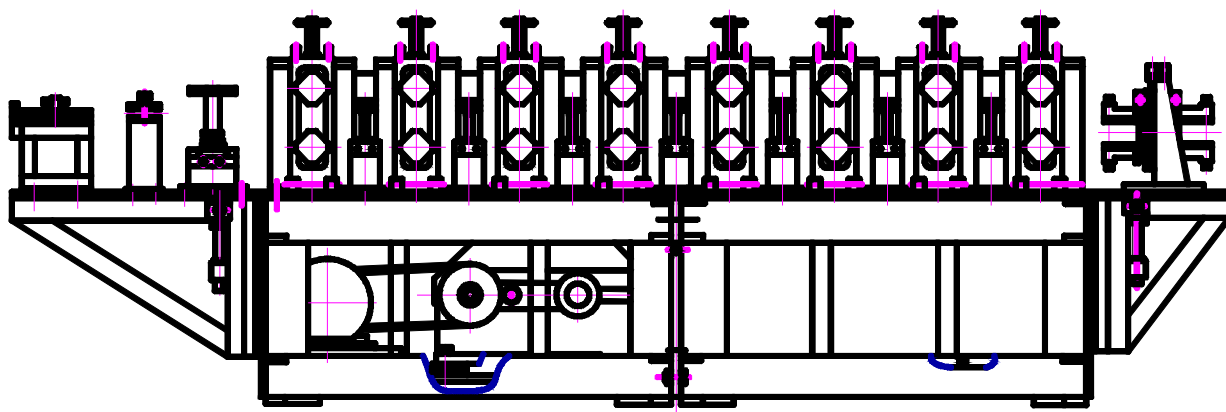


Рис. 5.23. Универсальный профилегибочный стан ООО «Спецтехнология»

2. Стан профилегибочный по п. 1, отличающийся тем, что каждая упомянутая промежуточная клетка снабжена, по меньшей мере, двумя ползунами, на которых закреплены вертикально расположенные валы, со смонтированной на них технологической оснасткой, включающей ролики, фильеры и пр., причем ползуны установлены с возможностью горизонтального перемещения в пазах, выполненных в корпусе промежуточной клетки.

3. Стан профилегибочный по п. 1, отличающийся тем, что правильное устройство содержит стол, смонтированный на станине задней клетки, включающий основание сварной конструкции, имеющее симметрично расположен-

ные вертикальные стенки, на которых симметрично с обеих сторон закреплены основные плиты, установленные с возможностью их вертикального перемещения посредством ходовых винтов, и закрепленные на них дополнительные плиты, смонтированные с возможностью горизонтального перемещения посредством регулировочных винтов, причем на дополнительных плитах установлены обоймы, содержащие по две пары осей каждая с правильными роликами, выполненные с возможностью поворота в вертикальной плоскости относительно оси профилирования посредством червячной передачи и регулировочных винтов.».

Привод стана, описанного выше, характеризуется указанными ниже признаками согласно охранному документу ООО «НПО «ИДМ» (Патент РФ № 58399 (U1), МПК В21D 5/06. Привод многоклетьевого профилегибочного стана, преимущественно легкого или среднего типов (варианты) / С.В. Филимонов, В.И. Лапшин, В.А. Литвинов, Д.П. Зарубин. Опубл. 27.11.2006. Бюл. № 33): «Привод многоклетьевого профилегибочного стана, преимущественно легкого или среднего типов с верхними и нижними рабочими валами, предназначенный для передачи крутящего момента упомянутым рабочим валам и содержащий электродвигатель, редуктор, отличающийся тем, что привод профилегибочного стана в каждой секции выполнен отдельным и снабжен зубчатыми колесами, раздаточной коробкой с шестернями, установленными в раздаточной коробке, и карданными валами, взаимодействующими с рабочими валами профилирующих клеток, причем шестерни в раздаточной коробке верхние относительно нижних установлены со смещением осей в вертикальной и горизонтальной плоскостях, при этом оси упомянутых шестерен образуют синусоидальную кривую, причем шестерни установлены с возможностью взаимодействия между собой.

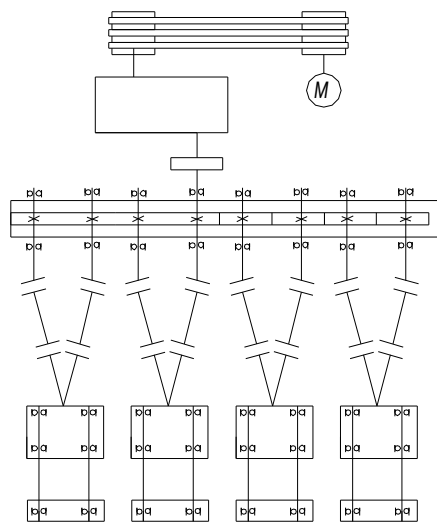


Рис. 5.24. Привод профилегибочного стана

2. Привод по п. 1, отличающийся тем, что упомянутые карданные валы выполнены быстросъемными, с возможностью передачи крутящего момента, как на все рабочие валы профилирующих клеток, при всех включенных карданами валах, так и избирательно в различных сочетаниях.

3. Привод многоклетьевого профилегибочного стана преимущественно легкого или среднего типов с верхними и нижними рабочими валами, предназначенный для передачи крутящего момента упомянутым рабочим валам и содержащий электродвигатель, редуктор, отличающийся тем, что привод профилегибочного стана для каждой двух секций стана выполнен единым и снабжен зубчатыми колесами, раздаточной коробкой с шестернями, установленными в раздаточной коробке, и карданными валами, взаимодействующими с рабочими валами профилирующих клеток, при этом упомянутый электродвигатель кинематически связан посред-

точной коробкой с шестернями, установленными в раздаточной коробке, и карданными валами, взаимодействующими с рабочими валами профилирующих клеток, при этом упомянутый электродвигатель кинематически связан посред-

ством клиноременной передачи, с упомянутыми редуктором, зубчатыми колесами, раздаточной коробкой с шестернями и карданными валами, взаимодействующими с рабочими валами профилирующих клетей, причем шестерни в раздаточной коробке верхние относительно нижних установлены со смещением осей в вертикальной и горизонтальной плоскостях, при этом оси упомянутых шестерен образуют синусоидальную кривую, причем шестерни установлены с возможностью взаимодействия между собой.

4. Привод многоклетьевого профилегибочного стана, преимущественно легкого или среднего типов, предназначенный для передачи крутящего момента упомянутым рабочим валам и содержащий электродвигатель, редуктор, отличающийся тем, что привод профилегибочного стана для каждой трех секций стана выполнен единым и снабжен зубчатыми колесами, раздаточной коробкой с шестернями, установленными в раздаточной коробке, и карданными валами, взаимодействующими с рабочими валами профилирующих клетей, при этом упомянутый электродвигатель кинематически связан посредством клиноременной передачи, с упомянутыми редуктором, зубчатыми колесами, раздаточной коробкой с шестернями и карданными валами, взаимодействующими с рабочими валами профилирующих клетей, причем шестерни в раздаточной коробке верхние относительно нижних установлены со смещением осей в вертикальной и горизонтальной плоскостях, при этом оси упомянутых шестерен образуют синусоидальную кривую, причем шестерни установлены с возможностью взаимодействия между собой».

Клеть стана (Патент РФ № 44551 (U1), МПК В21D 5/06. Клеть профилегибочного стана для непрерывного профилирования / В.А. Литвинов, В.В. Левщанов, Д.П. Зарубин, С.В. Филимонов, В.И. Лапшин. Опубл. 27.03.2005. Бюл. № 9, патентообладатель – ООО «Спецтехнология») имеет следующие характерные признаки: «1. Клеть профилегибочного стана для непрерывного профилирования, содержащая корпус с основанием и стойками, на которых закреплены установленные один над другим с зазором, валки с рабочими поверхностями, при этом, по меньшей мере, один валок выполнен с выступами, прилегающими к рабочим участкам закрытого калибра, отличающаяся тем, что клеть снабжена установленной в основание замыкающей серьгой, смонтированной с одной из сторон клетки и ползунами, верхним и нижним, установленными один над другим с зазором и закрепленными в упомянутых стойках с одной стороны клетки и на замыкающей серьге, с другой стороны клетки, при этом верхний и нижний валы выполнены приводными и установлены в упомянутые ползуны, преимущественно на подшипниках качения, с возможностью их вертикального перемещения вместе с ползунами по стойкам посредством подъемных ходовых винтов, расположенных симметрично относительно корпуса клетки, преимущественно по два в верхних и нижних ее частях, причем со-

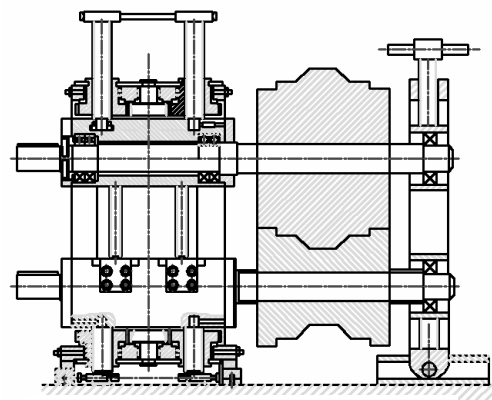


Рис. 5.25. Клеть профилегибочного стана

пряженные между собой по калибру, валки снабжены компенсирующими распорными втулками, размещенными на нижнем валу с обеих сторон от формирующих охватывающих валков, и соединены торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадок «в замок» по Н7/h7, а также они выполнены замкнутыми по всему периметру рабочего контура и при горизонтальном расположении краев профиля ограничены по торцам упомянутыми выступами, а при вертикальном расположении краев профиля ограничены по торцам уступами».

Технологическое оснащение для осуществления интенсивного формообразования профилей (Патент РФ № 42451 (U1), МПК В21D 5/06. Валки рабочей клетки профилегибочного стана / В.А. Литвинов, П.И. Зарубин, Д.П. Зарубин, С.В. Филимонов, В.И. Лапшин. Оpubл. 10.12.2004. Бюл. № 34, патентообладатель – ООО «Спецтехнология») характеризуется следующим: «Валки рабочей клетки многоклетьевого профилегибочного стана, преимущественно для изготовления профилей сложного поперечного сечения, сопряженные между собой по калибру, образованному рабочими ручьями валков и ограниченными направляющими буртами, отличающиеся тем, что нижние валки каждой пары сопряженных между собой по калибру валков в каждой рабочей клетки профилегибочного стана выполнены разной ширины и снабжены компенсирующими распорными втулками разной ширины, размещенными на нижних валах с обеих сторон от профилирующих охватывающих валков таким образом, что вместе с нижними охватывающими валками образуют постоянный одинаковый размер суммарной размерной цепи от основной оси профиля до установочной базы в каждом калибре каждой клетки профилегибочного стана, при этом упомянутые пары формирующих роликов в каждом калибре каждой клетки профилегибочного стана соединены торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадкой «в замок» по Н7/h7 и выполнены с постоянным боковым размером вертикального зазора в калибре каждой клетки профилегибочного стана, при этом калибр каждой рабочей клетки многоклетьевого профилегибочного стана выполнен замкнутым по всему периметру рабочего контура и при горизонтальном расположении краев профиля ограничен по ширине по торцам упомянутыми направляющими буртами, а при вертикальном расположении краев профиля ограничен по ширине по торцам уступами».

Резка профиля на мерные длины в единой технологической цепочке его производства осуществляется на пневматическом прессе (рис. 5.24) (Патент РФ № 49741 (U1), МПК В21D 22/02. Пресс пневматический для разделительных операций / В.А. Литвинов, А.В. Филимонов, Д.П. Зарубин, С.В. Филимонов, В.И. Лапшин. Оpubл. 10.12.2005. Бюл. № 34, патентообладатель – ООО «Спецтехнология») и характеризуется следующими признаками: «Пресс пневматический для разделительных операций, включающий штамп для разделительных операций, снабженный передвижной кареткой, содержащей верхнюю и нижнюю плиты, соединенные между собой вертикальными элементами, и имеющей круглые катящиеся элементы передвижения, установленные в направляющие, при этом на верхней плите передвижной каретки установлен пневмоцилиндр и пуансонодержатель, на котором закреплен пуансон, а на нижней плите передвижной каретки установлена матрица, закреплена на матрицедержателе, и при

чем передвижная каретка выполнена с возможностью горизонтального перемещения по упомянутым направляющим в технологическом процессе разделительных операций, преимущественно ленточной заготовки и с возможностью возврата в исходное положение, пресс снабжен электронным блоком управления, выполненным с возможностью синхронного перемещения ленточной заготовки и перемещающейся с передвижной кареткой матрицей со временем пробивки заготовки пуансоном и возврата его в исходное положение и конечным выключателем, выполненным с возможностью его срабатывания и аварийной остановки линии профилирования в случае продолжения движения передвижной каретки после поступления сигнала от электронного блока, отличающийся тем, что на упомянутой каретке передвижения верхняя и нижняя плиты выполнены неподвижными, а соединяющие их вертикальные элементы выполнены в виде стоек, при этом пресс установлен сверху на станине и содержит основание, на котором смонтированы упомянутые направляющие, выполненные в виде планок, при этом упомянутые круглые катящиеся элементы выполнены в виде подшипников качения или скольжения, с осями внутри, на которых закреплена упомянутая каретка передвижения, снабжен ресивером, установленным внутри станины, и блоком управления воздухом, закрепленным с торца станины и связанным трубопроводами с верхней и нижней полостями упомянутого пневмоцилиндра, причем упомянутый матрицедержатель выполнен в виде опор, установленных в пазах, выполненных на нижней неподвижной плите упомянутой передвижной каретки с возможностью передвижения вместе с закрепленной на них посредством шпонок упомянутой матрицей, фиксируемой к опорам посредством винтов, а упомянутый пуансонодержатель выполнен в виде промежуточного кронштейна, смонтированного на штоке пневмоцилиндра, выполненного с возможностью регулирования закрытой высоты штампа, с закрепленным на кронштейне упомянутым пуансоном, выполненным в виде ножа, причем пресс снабжен закрепленным к основанию кронштейном с поддерживающим заготовку роликом, пружиной для возврата прессы в исходное положение, закрепленной к блоку, склизу, расположенном внутри станины для сбрасывания отходов от рубки профиля, перфорации заготовки в провальное отверстие, расположенное на нижней плите передвижной каретки, при этом пресс снабжен пневмораспределителем, смонтированным на станине прессы, и выполненным с возможностью подачи воздуха в верхнюю и нижнюю полости пневмоцилиндра при поступлении сигнала на упомянутый электронный блок управления при аварийном выключении линии профилирования».

Штамп (Патент РФ № 44553 (U1), МПК В21D 22/02. Штамп для разделительных операций / В.А. Литвинов, П.И. Зарубин, Д.П. Зарубин, С.В. Филимонов, В.И. Лапшин. Опубл. 27.03.2005. Бюл. № 9, патентообладатель – ООО

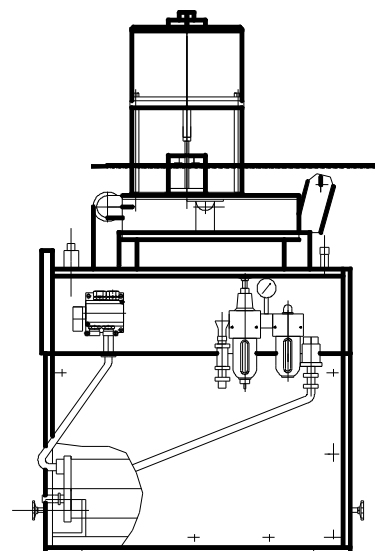


Рис. 5.26. Отрезной пневматический пресс

«Спецтехнология») к описанному выше отрезному прессу включает следующие характерные признаки согласно патенту: «1. Штамп для разделительных операций, содержащий верхнюю плиту, нижнюю неподвижную плиту, пуансон, матрицу, закрепленную на матрицедержателе, и пневмоцилиндр, отличающийся тем, что штамп снабжен направляющим устройством, смонтированным к торцу

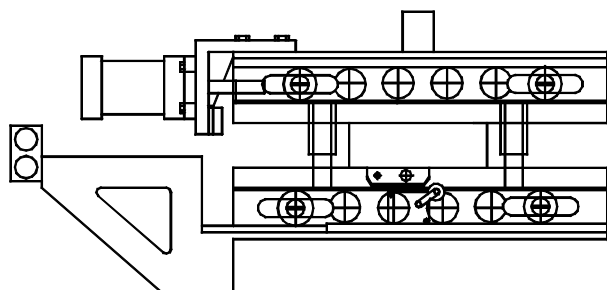


Рис. 5.27. Штамп для разделительных операций

нижней неподвижной плиты, и передвижной кареткой, содержащей верхнюю и нижнюю подвижные плиты, связанные между собой колонками, симметрично расположенной относительно продольной оси штампа и имеющей колеса, установленные в направляющие рельсы, смонтированные на нижней поверхности упомянутой верхней плиты штампа, выполненной неподвижной, и на верхней поверхности

упомянутой нижней неподвижной плиты штампа, при этом на верхней подвижной плите передвижной каретки установлен пуансонодержатель, на котором закреплен упомянутый пуансон, а на нижней подвижной плите передвижной каретки закреплены упомянутые матрицедержатель с матрицей, причем передвижная каретка выполнена с возможностью горизонтального перемещения по упомянутым направляющим рельсам в технологическом процессе разделительных операций, преимущественно ленточной заготовки, и с возможностью возврата в исходное положение посредством упомянутого пневмоцилиндра, штамп снабжен электронным устройством, выполненным с возможностью синхронного перемещения ленточной заготовки и перемещающейся с передвижной кареткой матрицей со временем вырубания заготовки пуансоном и возврата его в исходное положение».

Выводы

Модели процесса формообразования, полученные теоретически и подтвержденные экспериментально, позволяют производить расчет параметров профилегибочного оборудования: межклетьевого расстояния, диаметров валов и мощности привода. Оптимизация параметров оборудования, рассчитанного на определенную номенклатуру профилей, позволяет снизить массу профилегибочного оборудования на 17% и уменьшить его габариты в плане на 40 %.

С использованием разработанной модели динамического режима работы правильного устройства проведены расчеты его конструктивных элементов: фильер, пружин, стоек, что позволяет осуществлять правку профилей с начальной продольной кривизной до 10 высот поперечного сечения и обеспечивать их прямолинейность с отклонением не более 1,5 мм/м.

Выполнены разработки по созданию автоматизированных линий для реализации процессов интенсивного формообразования, положивших основу для последующих разработок и внедрения оборудования и технологии на многих десятках предприятий РФ и ближнего зарубежья.

6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ

Минимальное число переходов, используемое при формообразовании профиля, является одним из основных показателей рациональности выбранного метода его изготовления. В данном разделе рассмотрены наиболее важные вопросы разработки технологий интенсивного формообразования на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований (разд. 3 и 4) в приложении к потребностям промышленных предприятий РФ. По ряду вопросов проектирования технологии сделаны обобщения на номенклатуру профилей с элементами жесткости (рис. 2.2). Технология ориентирована на станки семейства ГПС и СПГ предприятий-разработчиков г. Ульяновска [162, 452].

6.1. Этапы проектирования технологического процесса формообразования профилей в роликах

Проектирование технологии интенсивного формообразования профилей осуществляется обычно поэтапно, в следующей последовательности: 1. Проработка чертежа профиля на технологичность; 2. Назначение геометрических параметров зоны сгиба; 3. Расчет ширины исходной заготовки; 4. Определение энергосиловых параметров процесса; 5. Выбор оборудования; 6. Выбор расположения профиля по отношению к осям основных валков; 7. Выбор основной оси профиля; 8. Выбор схемы и режимов формообразования; 9. Расчет числа переходов; 10. Определение конфигураций переходов; 11. Проектирование инструмента; 12. Оформление конструкторской и технологической документации.

Отметим, что время от времени предпринимаются более или менее удачные попытки разработки технологии производства профилей по схемам традиционного профилирования без серьезной научной поддержки. Обычно идут следующим путем. При проработке на технологичность чертежа профиля руководствуются общими требованиями технологичности [453], предъявляемыми к конструкции изделия с учетом особенности процесса формообразования. Ширину исходной заготовки определяют теоретически по соответствующим зависимостям с её последующим уточнением при отработке профиля. Выбор оборудования редко связывают с расчетом энергосиловых параметров процесса, а в качестве основного параметра используют число клетей, определяемое из опыта или исходя из наиболее общих рекомендаций, приведенных в специальной литературе. Опытом разработчика определяется выбор и других параметров: расположение профиля в валках, форма и положение основной оси профиля, углов подгибки и т.д. Окончательный переход формообразования составляется по чертежу профиля, с учетом пружинения [295]. Описанный процесс проектирования технологии не является оптимальным, часто приводит к ошибкам, устраняемым при отработке технологии, а зачастую оказывается и вовсе неудачным.

Указанные ранее отличия СИ и МИД вызывают также некоторые отличия в процедурах разработки технологии, в целом, сохраняя перечисленные выше этапы. Например, для стесненного изгиба характерна процедура [368], приведенная на рис. 6.1.

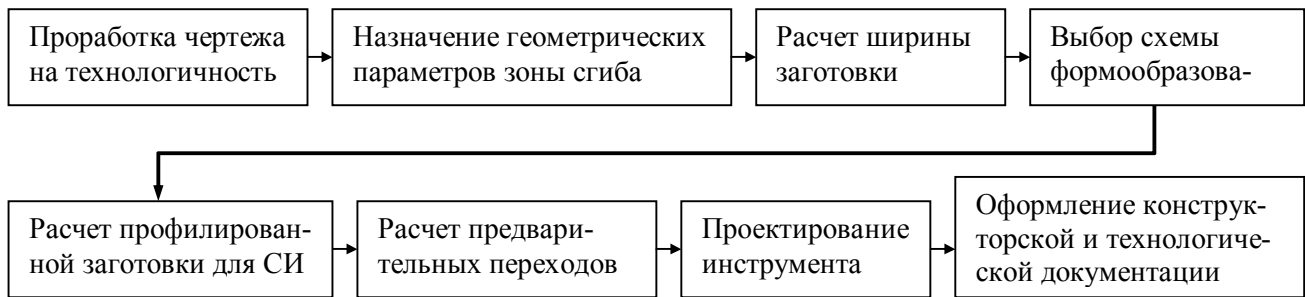


Рис. 6.1. Процедура разработки технологии изготовления профилей СИ

Новая проектная процедура разработки технологии для метода интенсивного деформирования (МИД) приведена в п. 6.14.

6.2. Технологичность изготовления профилей

Оценка технологичности профиля может производиться на двух стадиях: на стадии проектирования изделия (профиля) и на стадии технологической подготовки производства профиля данного типоразмера [357]. В работе [384] нами рассмотрены различные аспекты технологичности на основе экспертных оценок, где показано, что применительно к заданной номенклатуре гнутых профилей в сферах проектирования, производства и эксплуатации можно рассматривать лишь четыре характеристики технологичности гнутых профилей: функциональность, надежность, соответствие технологическим требованиям и, как интегральный показатель, экономичность. Последний показатель имеет следующие составляющие: трудоемкость, металлоемкость, энергоемкость и хроно-емкость, которые проявляются в основном в сфере производства. Установлены следующие методы обеспечения технологичности: *конструктивная преемственность* (унификация конструктивных элементов, взаимозаменяемость, симплификация), *технологическая рационализация* (параметрическая оптимизация номенклатуры профилей, оптимизационный метод выбора и назначения конструктивных элементов и материалов, размерный анализ, экономико-математическое моделирование), *технологическая преемственность* (типизация технологических процессов, унификация технологических операций, стандартизация средств технологического оснащения). Указанные методы применяются в практике разработки технологии под заданную номенклатуру профилей в ОАО «Ульяновский НИАТ».

С чисто технологической точки зрения для создания технологии изготовления отдельного профиля важными являются исходные данные (форма профиля, параметры его поперечного сечения, материал, требования к качеству профиля [357]), представленные в структурированном виде на рис. 6.2.

Общие требования технологичности производства профильных деталей типовой номенклатуры, подлежащих изготовлению методами интенсивного формообразования, формулируются следующим образом [344]:

- механические свойства листового материала должны обладать временным сопротивлением разрыву до 390 МПа, относительное удлинение должно быть не менее 6%;

- стремиться к снижению металлоемкости конструкции детали, за счет применения ребер жесткости, отбортовок и т.п.;
- уменьшать ассортимент применяемых толщин листового материала (предпочтительный ряд толщин: 0.6, 0.8, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5 мм);
- конструкция профиля открытого типа более предпочтительна, чем конструкция профиля закрытого и полужакрытого типов (с точки зрения изготовления);
- допуски на размеры поперечного сечения профилируемых деталей долж-



Рис. 6.2. Исходные данные профиля для анализа технологичности

ны соответствовать точности процесса профилирования (9-14-й квалитет). Допуск на длину детали нецелесообразно назначать менее $\pm 2\text{мм}$;

- избегать сложных конфигураций перфорированных отверстий с узкими и длинными вырезами ($b > 2s$);
- расстояние между перфорированными отверстиями не должно быть менее $(2\div 3)s$;
- расстояние от края перфорированного отверстия до края профилируемой полосы не должно быть менее $(3\div 5)s$;

- суммарная площадь перфорированных отверстий в поперечном сечении профилируемой полосы не должна превышать 50-70% от площади заготовки в поперечном сечении;
- минимально допустимые внутренние радиусы гибки составляют, как правило, $0.5s$ и назначать их следует только при конструктивной необходимости;
- минимально допустимая высота отбортовок составляет, как правило, $2s$ и назначать минимальные значения следует только при конструктивной необходимости (для традиционного профилирования высота отбортовок назначается не менее 4 толщин);
- прочность покрытия должна допускать изгиб на относительный радиусгиба не менее единицы.

В принципе, могут рассматриваться и требования к термической обработке, однако это характерно лишь для авиастроения в связи с изготовлением деталей из гнutoго профиля-полуфабриката.

Оценка технологичности многоэлементных профилей производится на основании предшествующих исследований и опыта разработчика. Данная проблема разрабатывается в настоящее время к.т.н. С.В. Филимоновым.

6.3. Расчет ширины заготовки и параметры угловой зоны

6.3.1. Стесненный изгиб

Ширина заготовки является важным технологическим параметром, определяющим качество профиля. На основе экспериментальных исследований [408] (см. п. 4.2, 4.3), а также с учетом соотношения (3.28), ширина заготовки B_3 , при которой можно получать профили с заданным внутренним радиусом r в условиях плоской деформации, определяются формулой [215, 216]:

$$B_3 = B_p + kS_0n, \quad (6.1)$$

где B_p – ширина развертки профиля; k – коэффициент, зависящий от свойств материала и получаемого внутреннего радиуса (рис. 6.3); n – число зон сгиба.

Ширину развертки профиля B_p находят по формуле:

$$B_p = \sum_{j=1}^M l_j + \frac{1}{S_0} \sum_{i=1}^N \left[(r_i + S_0)^2 - \frac{a \cdot r_i}{2} - R_i^2 + \frac{a_i \cdot R_i^2}{2} \right], \quad (6.2)$$

где M, N – число прямолинейных участков и число зон сгиба соответственно; l_j – длина j -го прямолинейного участка; r_i, R_i – радиусы кривизны внутреннего и наружного контуров i -ой зоны сгиба ($r_b = r_i/S_0$ на рис. 6.3).

При расчете ширины заготовки в случае свободного формообразования зоны сгиба радиусы в формуле (6.2) подлежат замене (см. п. 3.2):

$$r_i \approx S_0 \bar{a}_0 [1 + k(\alpha, 0, \eta_f)]/2, \quad R_i \approx (\bar{a}_0 + \eta_f) S_0 [1 + k(\alpha, \eta_f, \eta_f)]/2,$$

где $\bar{a}_0$ – относительная большая полуось аппроксимирующего эллипса.

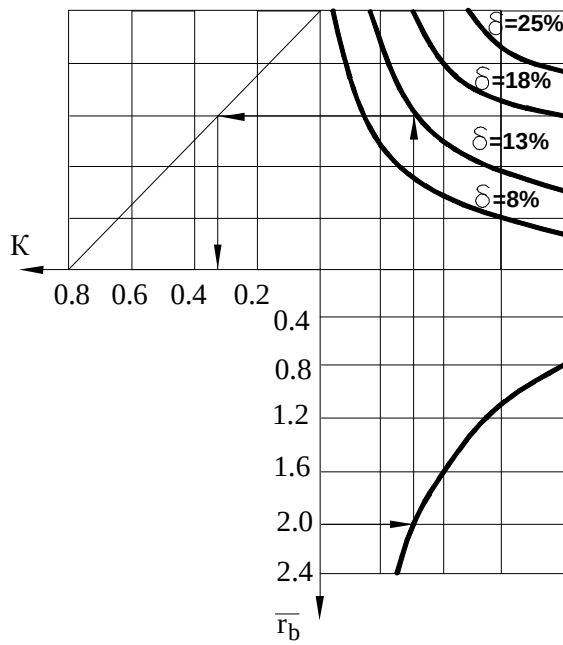


Рис. 6.3. Номограмма расчета коэффициента избытка заготовки

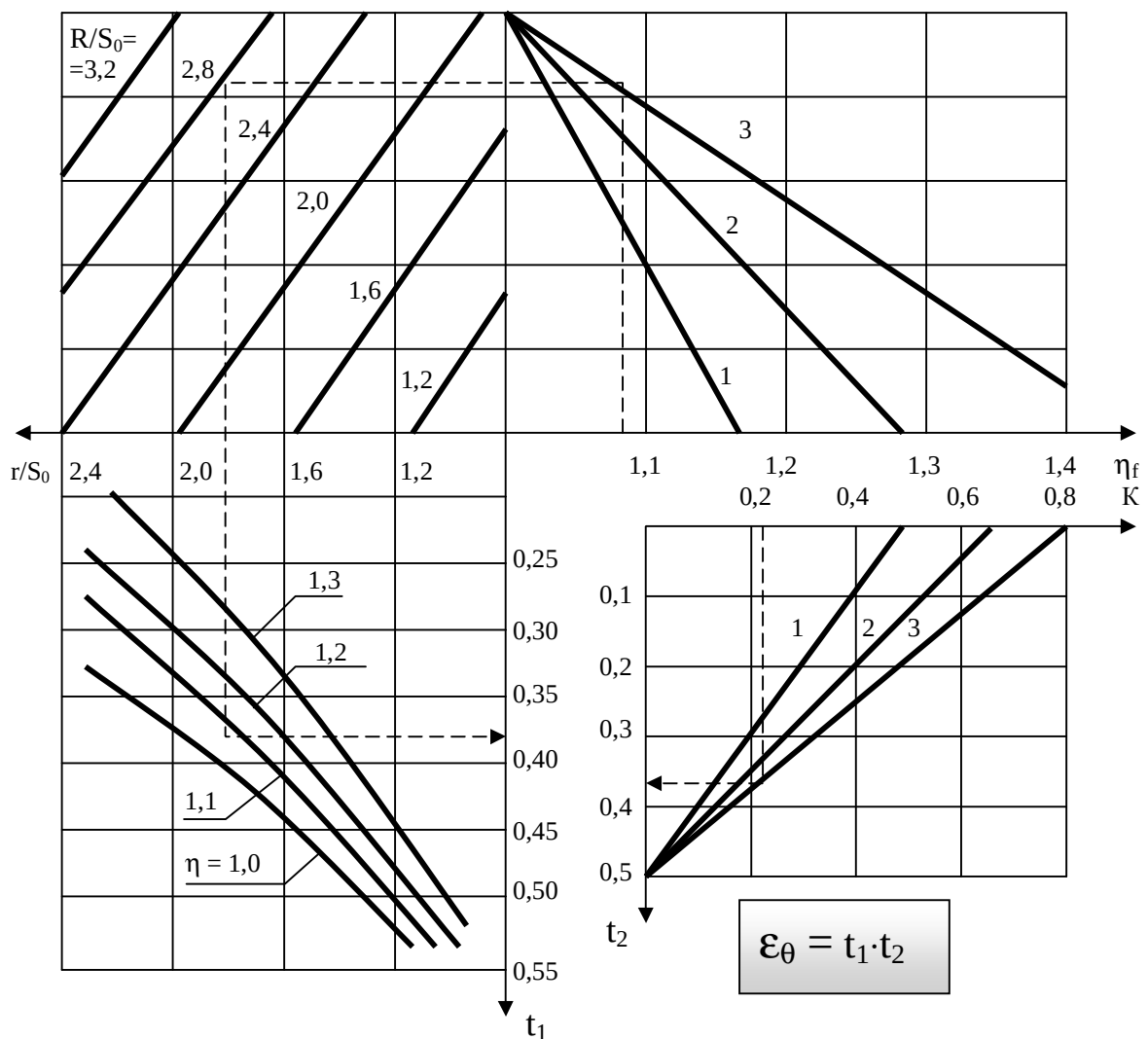


Рис. 6.4. Номограмма для расчета остаточной деформации по наружному контуру зоны сгиба: 1,2,3 – $\alpha = \pi/3; 2\pi/5; \pi/2$

Номограмма на рис. 6.3 получена с учетом сравнения относительно удлинения материала заготовки δ и деформаций на наружном контуре (3.28) в отсутствие дефектов на внутреннем контуре зоны сгиба (см. п. 4.3). На рис. 6.4 представлена номограмма для определения остаточной деформации [216].

При проектировании профиля конструктор обычно задает внутренний радиус и величину утолщения. **Связь геометрических параметров** зоны сгиба определяется простой формулой (4.9) [171, 361]:

$$(R - r)(1 - \cos\alpha) = S_0(1 - \eta_f \cos\alpha).$$

В работе [216] по формуле (4.9) построена номограмма для удобства определения параметров угловой зоны. Формула (4.9) может использоваться как при разработке конструкции профиля, так и при назначении скругления соответствующих участков роликов при разработке технологического оснащения.

Предельные возможности при стесненном изгибе можно определять по графикам рис. 4.11 и 4.12, а также номограмме Ю.М. Арышенского [314].

6.3.2. Метод интенсивного деформирования

Ширину исходной заготовки обычно определяют по длине нейтрального слоя, который, не подвергается деформации от изгиба. Известно достаточно большое количество методик по определению ширины исходной заготовки для традиционного профилирования, где нейтральный слой напряжений (НСН) смещается в сторону сжатых волокон, что также сопровождается утонением металла в зоне сгиба [127, 98, 201]. При применении метода интенсивного деформирования НСН практически не изменяет своего начального положения (рис. 6.5), поэтому радиус нейтрального слоя можно определить по формуле:

$$r \approx r + \frac{s}{2}, \quad (6.3)$$

где r – внутренний радиусгиба, мм; s – толщина заготовки, мм.

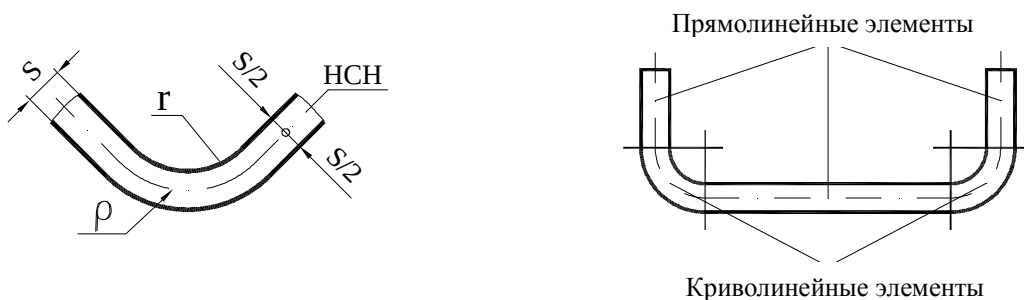


Рис. 6.5. Нейтральный слой напряжений и элементы профиля

Для определения ширины исходной заготовки $B_{\text{заг}}$ по средней линии, при которой можно получать профили с заданным внутренним радиусом r , производим разбиение поперечного сечения на отдельные прямолинейные и криволинейные элементы (рис. 6.5). Общая длина развертки поперечного сечения профиля по средней линии при многоугловой гибке определяется так:

$$B_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n (B_{np})_i + \sum_{i=1}^n \frac{pa_i}{180^\circ} \left(r_i + \frac{s}{2} \right), \quad (6.4)$$

где первое слагаемое в правой части формулы (6.4) дает сумму прямолинейных участков, а второе – сумму длин криволинейных участков.

Полученная формула (6.4) хорошо зарекомендовала себя в производственных условиях при обработке технологического оснащения и изготовлении партий гнутых профилей методом интенсивного деформирования.

6.4. Число технологических переходов

При **СИ** число переходов определено отработанными схемами формообразования (см. п. 3.4 и 4.7 работы) [368, 215, 411, 216].

При **МИД** число переходов определяется на основе разработанной модели (3.134 – 3.136), описанной в п. 3.11 и 4.13 [383, 344].

При **производстве гофрированных профилей** количество переходов находят путем решения системы рекуррентных соотношений (3.122) и численного определения количества переходов в соответствии с неравенством (3.132) [381] (см. также п. 3.10 работы).

6.5. Выбор профилегибочного оборудования

Для производства **СИ** профилей для авиационных конструкций выбор оборудования определен в соответствующей НТД [368, 215, 411, 216]. В основном, это – станки модели ГПС-200х, хотя технология производства профилей для самолетов АН-70 и АН-140 была реализована в 2001 г. на базе станка ГПС-300 (см. Сводный акт внедрения в приложении).

В общем случае процедура выбора профилегибочного станка должна следовать методике, изложенной в п. 5.1.1:

- Определение распирающего усилия по формуле (4.21) и момента по формуле (4.36);
- Расчет мощности привода и диаметра рабочих валов по формулам (5.1) и 5.2) соответственно;
- Расчет межклетьевого расстояния по формуле (3.56) или по формуле (5.3);
- Установление ширины развертки заготовки (формула (6.1)), ее толщины и марки материала;
- Определение числа переходов для данного профиля на основе работы [216];
- Сравнение расчетных данных мощности привода, диаметра рабочих валов, межклетьевого расстояния, характеристик заготовки и числа переходов с паспортными данными наличного парка станков, выбор оборудования.

При **МИД** силовые параметры процесса не имеют существенного значения, будучи заведомо достаточными для формообразования заготовок, указанных в паспорте станка. Число переходов определяется моделью (3.134 – 1.136). Выбор оборудования для производства широкополочных профилей осуществляется по более сложному алгоритму [344] (см. п. 6.14).

6.6. Определение способа формообразования

6.6.1. Угловой профиль

Угловой профиль с шириной полок до 30 толщин исходной заготовки можно изготавливать по традиционной схеме СИ или с продольной разрезкой швеллерного профиля, изготовленного стесненным изгибом [368, 408, 216]. Можно также использовать наше изобретение [409] (см. формулы (3.58 – 3.60) или расчетную зависимость для подгибки полок в изобретении [217] (см. формулу (3.64) в п. 3.4). Целью изобретений [409, 217] было уменьшение числа переходов и повышение качества профилей.

Изготовление угловых профилей из композиционных материалов в роликах сталкивается со значительными проблемами (см. п.4.3). С этой целью можно использовать изобретение [403] **«Способ гибки профилей из листовых малопластичных материалов и устройство для его осуществления»**, цель которого – улучшение качества профиля путем уменьшения деформации сжатия по внутреннему контуру

зоны сгиба (рис. 6.6). *Существенные отличия изобретения:* 1) растягивающие напряжения на внутреннем контуре; 2) смещение центра вращения балки; 3) планка-подложка с выступом. Аналогичное устройство было предложено нами ранее [404] (рис. 6.7). Целью устройства было расширение технологических возможностей за счет гибки слоистых и малопластичных материалов. *Существенные отличия изобретения:* 1) наличие подвижной планки; 2) соединение планок в неплотный шип; 3) ось вращения тяги подвижной планки смещена вверх по отношению к

Центр вращения
балки

Прижимная
планка

Планка-
подложка
с выступом

Заготовка

Поворотная
балка

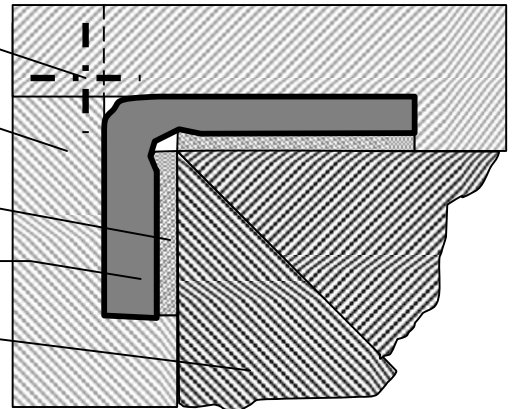


Рис. 6.6. Способ и устройство для гибки угловых профилей из композиционных материалов

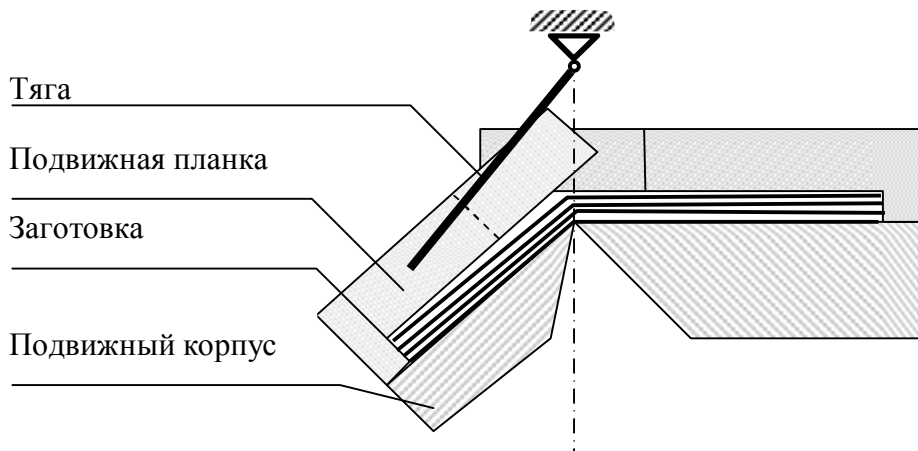


Рис. 6.7. Устройство для гибки

оси вращения корпусов.

6.6.2. Швеллерный профиль

Изготовление швеллерного профиля **стесненным изгибом** возможно по способу, определенному в работах [216, 368] (см. п. 3.4). Для случая использования **МИД** нами предложены следующие апробированные способы:

1) Способ изготовления широкополочных швеллерных и корытных симметричных тонкостенных профилей [454], целью которого является сокращение числа переходов. *Существенные отличия:* число переходов при $v < 20$ м/мин определяют по формуле:

$$N = K \cdot \left[\frac{L - 2b \cdot \sin \alpha}{D_0} \cdot \frac{r_d^2}{r_e \cdot s_0} \cdot \frac{x(1 - \cos \alpha)}{1 + x \cdot \cos \alpha} \cdot n \right]^{1/2}$$

где K – коэффициент, учитывающий тип профиля и принимающий значения 3,0 и 2,0 для швеллерного и корытного профиля соответственно; L – межклетье-евое расстояние в мм; D_0 – базовый диаметр нижнего формующего ролика в мм; s_0 – толщина стенки профиля в мм; r_d – конструктивно допустимый радиус зоны сгиба (в мм) для данного материала, равный $1,0 s_0$ и $1,5 s_0$ для сталей и

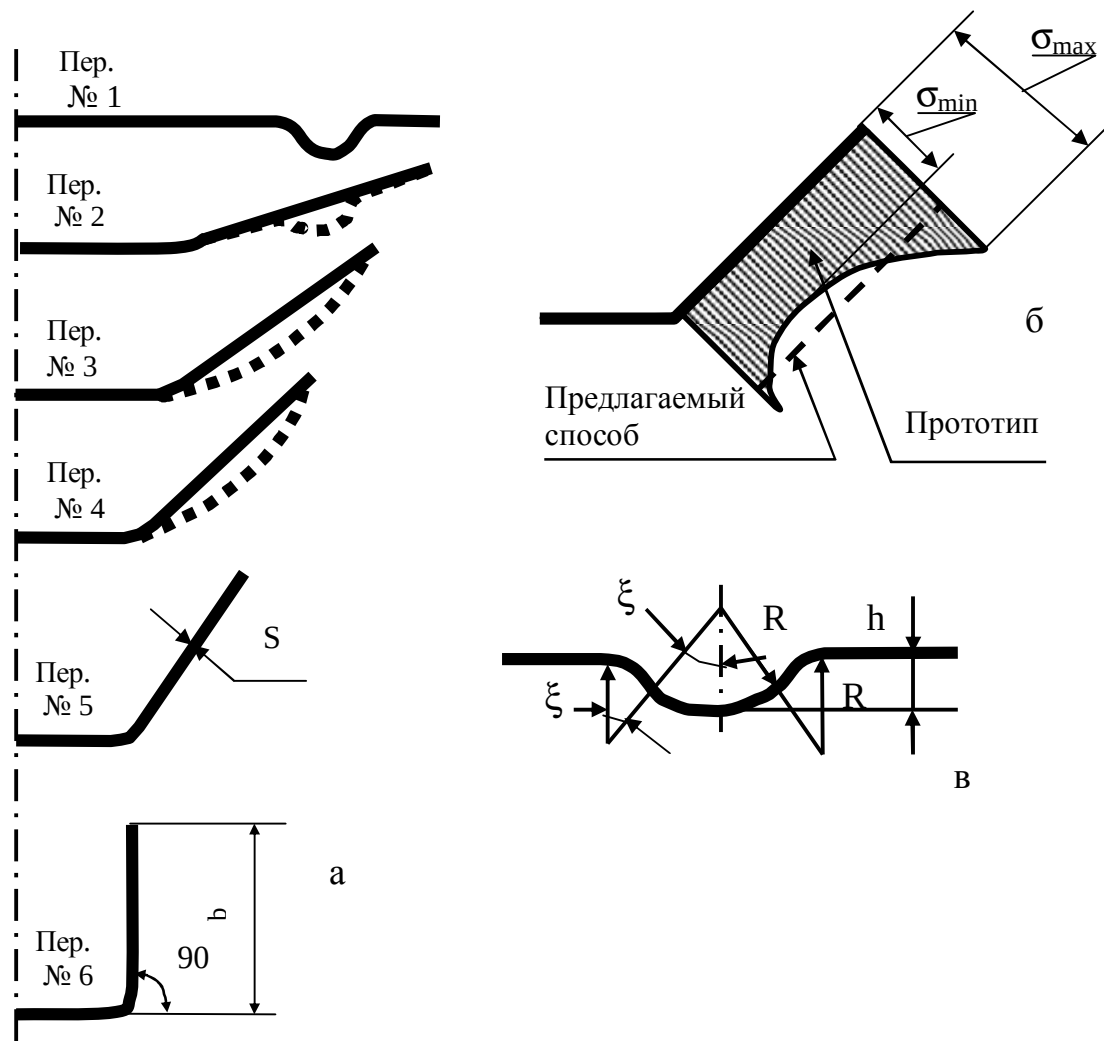


Рис. 6.8. Иллюстрация способа [455]: а) – схема формообразования; б) – распределение напряжений в подгибаемой полке; в) – геометрические параметры технологического рифта

цветных сплавов соответственно; r_g – радиусгиба в мм; x – параметр «стеснения» профиля, равный $2b/l^2$; l^2 – длина горизонтальных участков на готовом профиле в мм; n – число зон сгиба профиля.

2) Способ изготовления симметричных профилей [455], имеющий целью предотвращение кромковой волнистости и нарушение покрытия. *Существенные отличия* (рис. 6.8): 1) технологический рифт в середине полки на первом переходе; 2) подгибка полки и спрямление рифта во втором переходе; 3) продольный прогиб в межклетьевом пространстве со спрямлением в закрытом калибре по крайней мере в одной из клеток, причем высота рифта:

$$\bar{h} = 2\bar{R} \left[1 - \cos \left(\frac{\bar{b}}{12\bar{R}} \right) \right],$$

где $\bar{h}$ – относительная высота рифта ($\bar{h} = h/S_0$); $\bar{R}$ – относительный радиус сопряжения элементов рифта ($\bar{R} = R/S_0$); $\bar{b}$ – относительная ширина полки ($\bar{b} = b/S_0$); S_0 – толщина заготовки.

3) Способ изготовления гнутых профилей с гофрами жесткости в донной части [382], цель которого состоит в предотвращении кромковой волнистости и поперечных гофр, уменьшении числа переходов. *Существенные отличия*: 1) приложение скользящей силы на 1/3 от торцов полки; 2) осадка гофр с радиусами более допустимых в предчистовом переходе; 3) обжатие донной части на 0,05 толщины; 4) калибровка в чистовом переходе (см. также рис. 3.41, п. 3.10).

4) Способ изготовления швеллеров преимущественно из материалов с покрытием [456], цель которого – обеспечение сохранности покрытия и снижение числа переходов (рис. 6.9). *Существенные отличия*: 1) Чашеобразное сечение с максимальной кривизной в местах будущих сгибов и нулевой кривизной на концах и в середине дна; 2) Последующая подгибка периферийных элементов и их выпрямление; 3) радиусы зон сгиба по переходам назначают в соответствии с формулой:

$$r_n = \frac{1}{N-2} \cdot [(N-n-1) \cdot r_1 + (n-1) \cdot r_s]$$

где r_n – радиус кривизны будущей зоны сгиба в текущем переходе n ; N – общее число переходов; r_1 – радиус кривизны в месте будущего сгиба в первом пере-

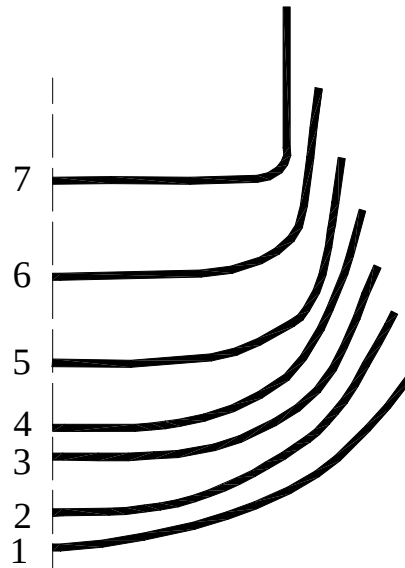


Рис. 6.9. Схема формообразования швеллерного профиля с покрытием

ходе, соответствующий началу пластического деформирования наружного контура; r_3 – заданный внутренний радиус зоны сгиба на готовом профиле.

Способы [455, 456] имеют существенное значение для изготовления профилей с покрытием толщиной более 1 мм, причем способ [456] определяет несколько иной вид формовки, отличный от принятого в методе интенсивного деформирования [344] (см. п. 6.10). Схема рис. 6.9 исследована по поведению аналитической зависимости кривизны заготовки на характерных участках совместно с условиями их сопряжения.

6.6.3. Корытный профиль

При СИ способы изготовления корытного профиля без отбортовок и с отбортовками определены в работах [216, 167, 411]. Можно также применять другие апробированные способы по нашим изобретениям, в частности:

1) Способ изготовления листовых профилей с отбортовками [371], цель кото-

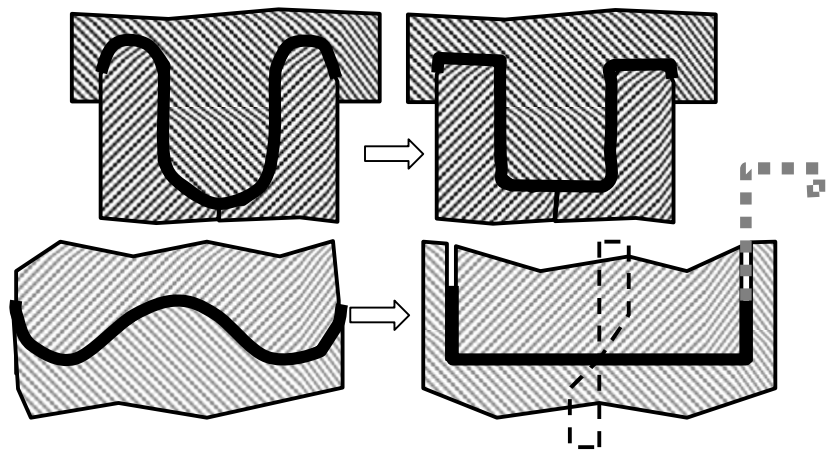


Рис. 6.10. Способ производства корытного и зетового профиля [371]

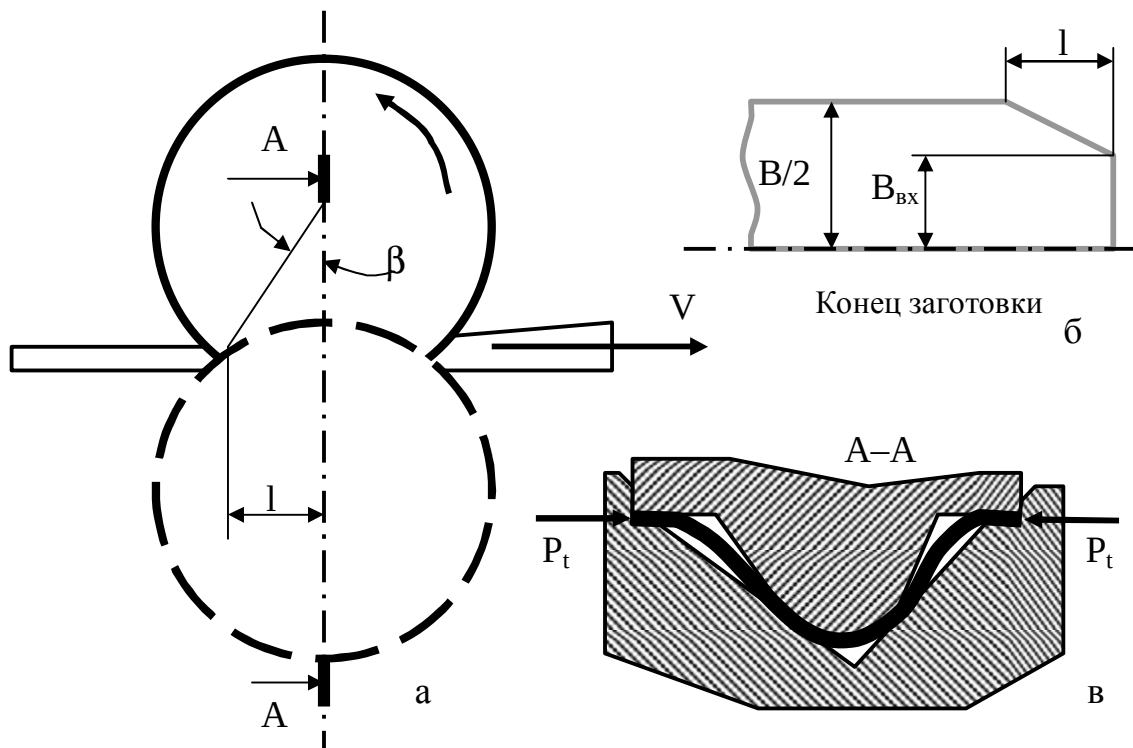


Рис. 6.11. Способ и устройство для производства корытообразных профилей: а) – схема прокатки; б) – форма конца заготовки; в) – конфигурация формирующего инструмента

рого – повышение жесткости профилей за счет бульбообразного утолщения на концевых участках (рис. 6.10). *Существенные отличия:* а) – прямая схема: 1) Радиус на предварительном переходе равен половине ширины полки; 2) Осадку и выпрямление полок производят на последнем переходе; б) – обратная схема (в том числе для производства Z-образного профиля): 1) Радиусы трех дуг одинаковы; 2) Последний переход – осадка и выпрямление дна; 3) Продольная разрезка в роликах;

2) Способ изготовления тонкостенных корытообразных профилей из листовых заготовок и устройство для его реализации [221], целью которого является расширение технологических возможностей за счет изготовления профилей из малопластичных материалов толщиной 0,5-0,8 мм, а также повышение качества профилей (рис. 6.11). *Существенные отличия:* а) **Способ:** 1) Выполнение скосов заготовки по длине, соответствующей углу захвата; 2) На предварительных переходах заготовку зажимают в центральной части; 3) На окончательном переходе смещают прогиб полок заготовки к торцам; б) **Устройство:** 1) Конические поверхности роликов – пересекающиеся прямые, касательные к криволинейной поверхности центральной части верхнего ролика 2) Горизонтальные участки нижнего и верхнего роликов имеют между собой зазор.

3) Способ изготовления профилей из труднодеформируемых материалов [372], предусматривающий всестороннее сжатие профиля в очаге деформации;

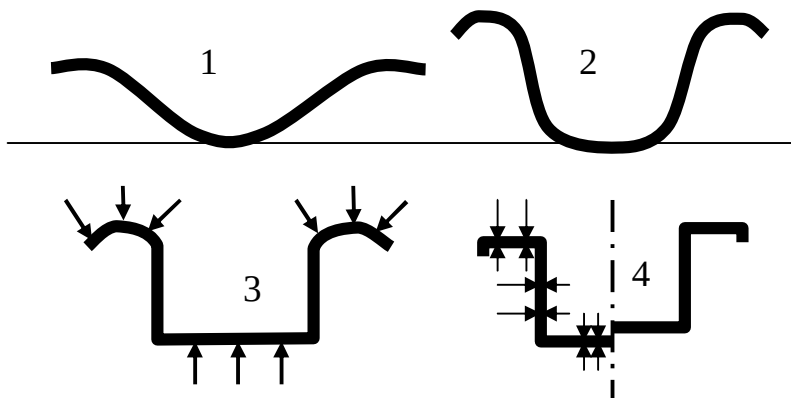


Рис. 6.12. Способ изготовления корытного и зетобразного профиля с использованием продольной разрезки

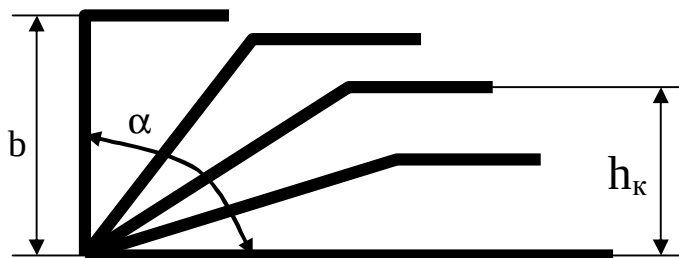


Рис. 6.13. К иллюстрации способа [217]

4) Способ изготовления гнутых профилей [370], целью которого – расширение технологических возможностей, уменьшение числа переходов и повышение качества за счет малого радиусагиба и утолщения (рис. 6.12). *Существенные отличия:* 1) волнообразная форма на первых двух переходах; 2) осадка стенки на третьем переходе; 3) осадка полок + разрезка + сдвиг + обжим на 0,05 толщины.

При использовании МИД следует использовать способы, описанные в работе [344], а также технические решения по нашим изобретениям:

1) Способ изготовления гнутых профилей проката [217], в котором целью является повышение качества за счет уменьшения волнистости кромок и продольного изгиба (рис. 6.13). Существенные отличия: смещение кромок по вертикали на расстояния:

$$h_k = \frac{b}{2} \cdot \left[\sin\left(\frac{a \cdot k}{N}\right) + \frac{k}{N} \cdot \sin a \right],$$

где k – номер перехода; b – ширина полки; N – общее число переходов; α – суммарный угол подгибки.

2) Способ изготовления корытного профиля [457], цель которого – уменьшение числа переходов (рис. 6.14 и 6.15). *Существенные отличия:* 1) первый переход – подгибка на предельный угол; 2) на остальных – полки на одном уровне + упругое обжатие; 3) горизонтальное смещение – по формуле:

$$\Delta l_i = \frac{L_i}{L} \cdot H \cdot \frac{\cos(0,9\alpha_{np}) - \cos \alpha}{\sin \alpha},$$

где Δl_i – горизонтальное перемещение кромки заготовки в i -ом переходе ($i = 2, 3 \dots N$; здесь N – общее число переходов); L_i – межклетьеовое расстояние; L – база станка (расстояние между соответствующими валами первой и последней клеток станка); H – высота профиля; α_{np} – предельный угол подгибки в первой клетке станка; α – суммарный угол подгибки профиля (угол на готовом профиле).

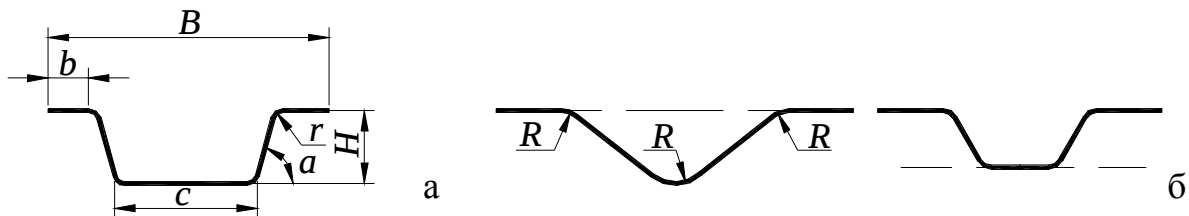


Рис. 6.14. Исходный профиль (а) и первый переход (б)

Данный способ позволяет изготавливать профили с весьма широкими горизонтальными полками. Патент [457] занял третье место в конкурсе изобретений по Ульяновской области за 2003 год.

6.6.4. Зетобразные профили

При **стесненном изгибе** рекомендуется применять способы, указанные в работах [216, 167, 411]. Могут также использоваться приведенные ранее способы по изобретениям [370] (рис. 6.12) и [371] (рис. 6.10). При **МИД** можно использовать способы, приведенные в описаниях изобретений [248 – 250, 254, 255, 257] (см. также п. 1.6), а также указания работы [344] по их адаптации к методу интенсивного деформирования. Классические способы изготовления зетобразных профилей без отбортовок предусматривают наклон стенки по отношению к горизонтали. Такие профили обычно не вызывают технологических проблем при их изготовлении.

6.6.6. С-образные профили

Профили С-образной конфигурации (как и сложные многоэлементные закрытые и полузакрытые профили) изготавливаются исключительно методом интенсивного деформирования (см. работы [344, 62, 2, 429, 421, 422, 458]).

Способы, описанные в разд. 1.6, отчасти могут использоваться (разумеется, с существенной адаптацией к МИД) в процессах интенсивного формообразования профилей. Некоторые из изобретений разд. 1.6 (около 100 охраняемых документов) использованы нами в качестве аналогов и прототипов при подаче заявок на изобретения и при разработке схем формообразования.

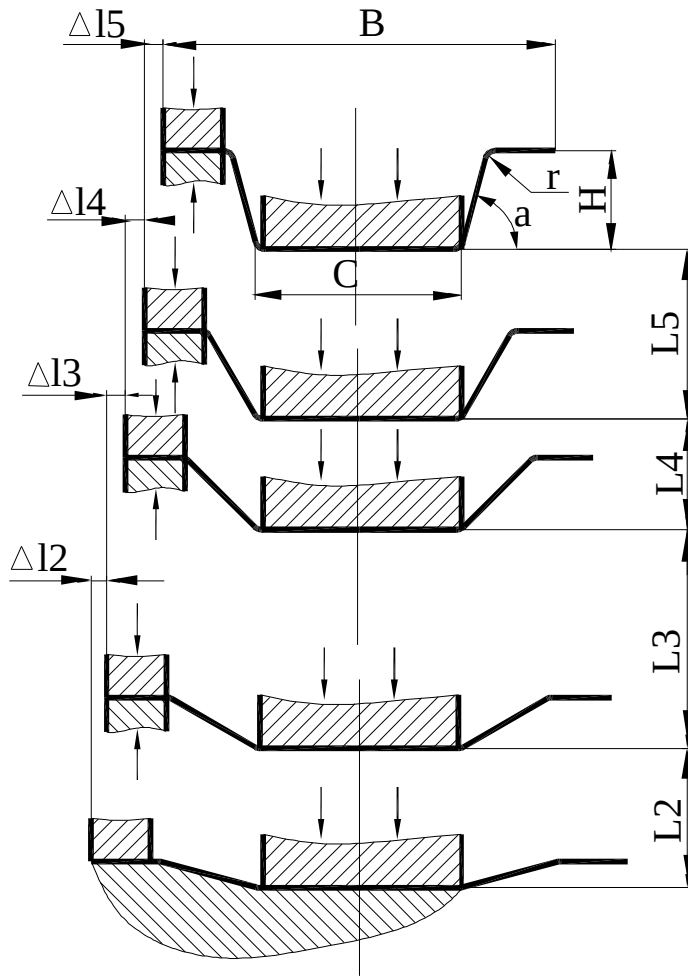


Рис. 6.15. Схема реализации способа [457]

6.7. Технологические схемы формообразования при МИД

Технологические схемы формообразования, будучи неотъемлемой частью способа формообразования конкретного профиля, определяют его качество. При проектировании инструмента особое

внимание следует уделять выбору системы калибровки, схемы расчетов калибра, принципа формовки заготовки.

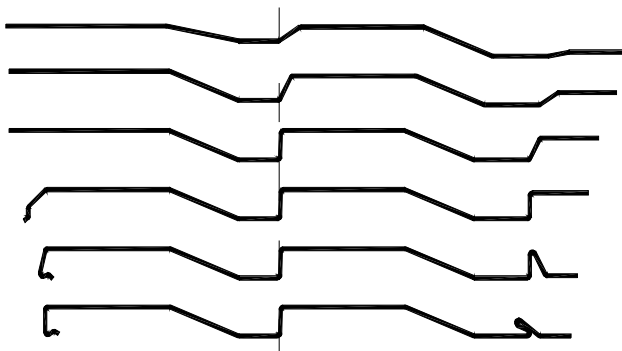


Рис. 6.16. Параллельная система калибровки роликов

В работах [201, 81, 340] основные системы калибровки делят на 5 групп:

- 1) Последовательная калибровка роликов, при которой подгибка элементов профиля осуществляется от оси профиля с последующей формовкой периферийных элементов;
- 2) Последовательная калибровка роликов, при которой подгибка элементов профиля начинается с краевых участков, с последующей формовкой

срединных участков; 3) Параллельная калибровка роликов, при которой формообразованию подвергаются все элементы сечения профиля одновременно; 4) Комбинированная калибровка роликов, при которой профилирование начинается одновременной формовкой всех или некоторых участков заготовки с последующей доформовкой отдельно каждого участка; 5) Калибровка роликов с осадкой волнообразной заготовки.

Эти системы калибровок имеют свои достоинства и недостатки. Метод интенсивного деформирования предполагает использование параллельной системы калибровки роликов, т.к. интенсификация процесса связана с уменьшением количества переходов формообразования. Кроме того, максимального экономического эффекта можно достичь только при использовании параллельной системы калибровки роликов (рис. 6.16).

Расчет калибров следует производить в направлении от готового профиля к исходной заготовке (против хода профилирования). Данная схема, в отличие от схемы расчета от заготовки к готовому профилю (по ходу формовки), позволяет исключить значительные погрешности расчетов из-за переформовки металла в местах изгиба и его перетяжки из одного элемента профиля в другой.

Выбор принципа формовки профилируемого металла связан с особенностями течения металла в угловой зоне. Известно три принципа формовки [194, 83, 340]: 1) формовка по кривой постоянного радиуса, равного внутреннему радиусугиба готового профиля, при этом приращение криволинейного участка происходит за счет периферийного элемента; 2) формовка по кривой постоянного радиуса, равного внутреннему радиусугибки готового профиля, при этом приращение криволинейного участка происходит за счет донной части профиля; 3) третий принцип формовки заключается в постепенном уменьшении радиусагиба до внутреннего закругления готового профиля.

Однако данные принципы формовки обладают рядом недостатков:

а) принципы 1 и 2 не учитывают особенности течения металла в угловой зоне и неприемлемы для изготовления сложных профилей; б) принцип 3 трудоемок в расчете калибров и их изготовлении, кроме того, этот способ связан с переформовкой угловой зоны с большего радиуса на меньший, что в ряде случаев приводит к нарушению покрытия при его наличии.

При реализации метода интенсивного деформирования рекомендуется применять другой принцип формовки, который характеризуется гибкой по кривой постоянного радиуса, равного радиусу внутреннего закругления готового профиля. При этом приращение криволинейного участка происходит равномерно за счет уменьшения длин элементов профиля, прилегающих к данной угловой зоне. Исключение составляют элементы, отгибаемые на угол $\alpha > 90^\circ$. Данный принцип применим для профилей любой степени сложности, и хорошо зарекомендовал себя на протяжении ряда лет в производственных условиях на предприятиях-разработчиках г. Ульяновска.

Описанные выше подходы к определению схем формообразования для МИД остаются справедливыми и для СИ, за исключением принципа формовки. Например, при последовательной подсадке радиус зоны сгиба уменьшается постепенно (третий принцип формовки). По такой схеме в 2004 г. по запросу

фирмы «Боинг» были изготовлены и переданы для испытаний партии гнутых профилей из титановых сплавов.

6.8. Скоростной режим формообразования

Скоростной режим формообразования оказывает существенное влияние на возможность получения профиля данного типоразмера, качество поверхности готовых профилей, износ рабочих валков, энергозатраты и т.д. [83, 340]. Скоростной режим формообразования понимается здесь в смысле различия скоростей участков рабочих поверхностей формующих роликов; о влиянии скорости профилирования (скорости движения профиля) см. разд. 1. Скорость движения профилируемой полосы определяется суммарным воздействием на нее верхнего и нижнего ролика. Скоростной режим формообразования определяется как расположением калибра, так и соотношением линейных скоростей соответствующих участков калибров смежных клетей.

При расположении калибра в валках целесообразно стремиться к тому, чтобы высота заготовки в каждом из технологических переходов была минимальной. На практике это достигается за счет рационального расположения профиля в основных валках (рис. 6.16.). С увеличением высоты изготавливаемого профиля увеличивается его относительное скольжение в валках, возникают энергетические потери на трение, появляются царапины, задиры и риски на поверхности готового профиля. При разработке схем формообразования и проектировании инструмента для создания правильного скоростного режима следует учитывать влияние высоты подгибаемого элемента и направление его подгибки (см. рис. 6.16). Кроме того, для обеспечения минимального скольжения валков по поверхности заготовки на наиболее нагруженных участках в идеале следует так расположить профиль, чтобы места изгиба формировались участками нижнего и верхнего роликов, имеющими одинаковые линейные скорости.

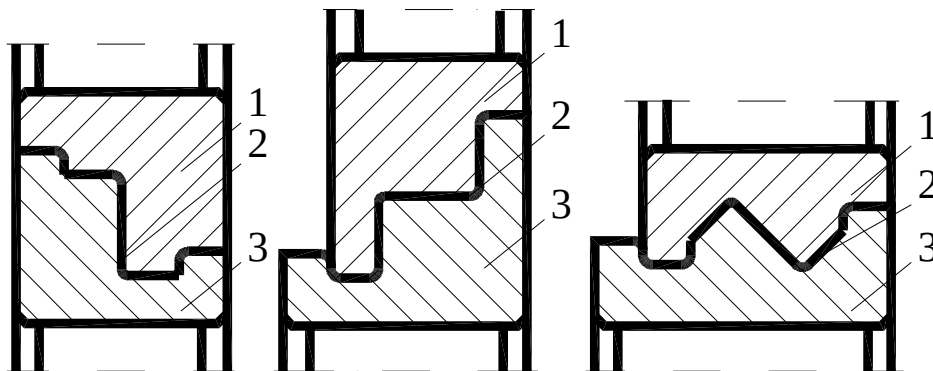


Рис. 6.16. Расположение профиля в валках для создания оптимального скоростного режима: а и б – нерациональное расположение; в – рациональное расположение; 1 – верхний валок, 2 – заготовка, 3 – нижний валок

При различии скоростей движения инструмента смежных клетей (скорость в предшествующей паре роликов больше, чем скорость в актуальной паре роликов) может наблюдаться «набегание» заготовки, проявляющееся в накоплении материала заготовки перед актуальной парой в виде зажимов, складок, продольного изгиба заготовки, потери ее устойчивости, что приводит к нару-

шению процесса профилирования. Во избежание продольного изгиба заготовки в межклетьевом пространстве переходные формы целесообразно выбирать таким образом, чтобы сечение заготовки на первых переходах имело бы достаточный момент инерции.

В обоснованных случаях на практике также применяют натяг кромки, описанный в разд. 3.3 (см. рис. 3.16). Данный прием позволяет не только предотвратить набегание материала, но и обеспечить эффективность использования межклетьевых проводок (при их необходимости). Учет влияния скоростного режима особенно важен при разработке технологии формообразования профилей закрытого и полузакрытого типов в связи с односторонним взаимодействием инструмента и заготовки на последних переходах.

6.9. Расположение заготовки по отношению к осям валков

При расположении заготовки в основных валках станка следует руководствоваться следующими условиями: 1) получение заданных форм и размеров профиля; 2) обеспечение требуемого качества поверхности профиля (особенно для декоративных, облицовочных профилей); 3) получение качественного профиля за минимальное количество переходных форм; 4) осуществление последующих технологических операций (резка, пробивка отверстий, сварка и т.д.); 5) обеспечение простоты наладки и удобства наблюдения за процессом профилирования.

При выборе положения профиля в основных валках следует располагать профиль таким образом, чтобы обеспечить минимальную глубину вреза в валки. Как правило, это достигается за счет расположения профиля большим размером вдоль осей валков. Необходимо также обеспечить возможность правки профиля для гарантии получения прямолинейности и отсутствия скручивания профиля вокруг продольной оси. Необходимо учитывать то, что в правильном устройстве может происходить изменение угловых размеров профиля, возникать кромковая волнистость и происходить нарушение поверхности профиля в виде задиров, царапин и т.д. Поэтому целесообразно располагать профиль в валках таким образом, чтобы по выходу из последней пары формующих валков он имел минимальные поводки.

Рассмотрим конкретный пример выбора расположения профиля F – типа по отношению к осям основных валков (рис. 6.17), который изготавливался в условиях экспериментального производства.

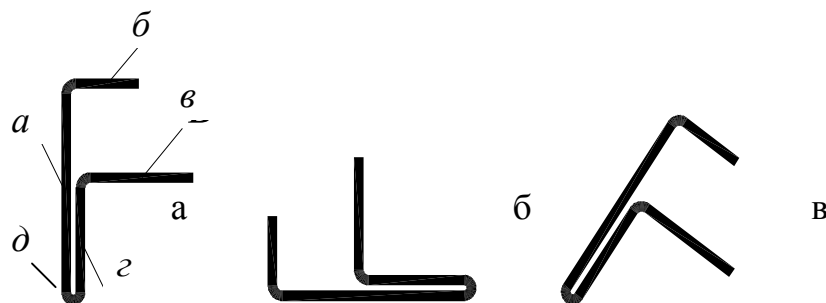


Рис. 6.17. Расположение профиля по отношению к осям валков

Профиль изготавливается из стальной оцинкованной ленты с полимерным покрытием для нужд строительной индустрии. Основные требования, предъявляемые к профилю: сохранение целостности покрытия, обеспечение прямолинейности изделия, отсутствие скручивания и кромковой волнистости.

При расположении профиля согласно рис. 6.17-а происходит нарушение покрытия по поверхностям **а**, **г**, полка **б** подвержена кромковой волнистости, профиль имеет значительную продольную кривизну и скручивание вокруг продольной оси. С случае расположения профиля согласно рис. 6.17-б наблюдается нарушение покрытия в зоне сгиба **д**; на полке **в** образуется кромковая волнистость, при этом поводки профиля незначительны и устранимы в правильном устройстве. Последний вариант расположения (рис. 6.17-в) является предпочтительным с точки зрения обеспечения качества: покрытие не нарушается, кромковая волнистость отсутствует, поводки минимальны.

6.10. Выбор основной оси профиля

Основной осью профиля (рис. 6.18, а-г) называется прямая линия, проходящая вдоль заготовки через такую точку сечения профиля, которая на всех технологических переходах не изменяет своего начального положения. Как правило, основная ось профиля параллельна установочной базе профилегибочного стана. Физически основная ось профиля принадлежит бесконечно узкой в поперечном направлении прямой полоске материала с высотой, равной толщине заготовки, проходящей вдоль всей длины заготовки. Участок профиля (рис.

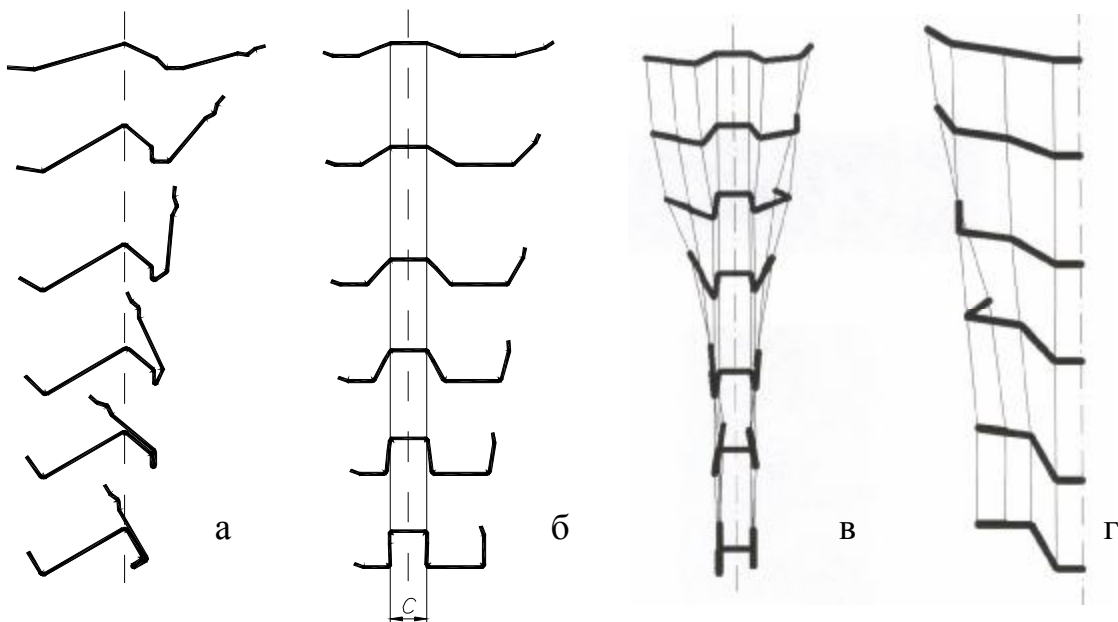


Рис. 6.18. Выбор основной оси профилирования при формообразовании многоэлементных профилей МИД

6.18,б-г), через который проходит основная ось и расположенный обычно параллельно осям валов, называется основным участком профиля (базовым элементом). На рис. 6.18-а базовым элементом является зона сгиба.

При выборе основной оси профиля руководствуются следующим: 1) основная ось профиля должна быть прямой; 2) ось профилирования по возможно-

сти должна делить ширину заготовки пополам; 3) жесткость подгибаемых элементов по обе стороны основной оси должны быть по возможности одинаковыми; 4) для симметричных профилей ось профиля должна проходить через ось симметрии профиля; 5) желательно, чтобы основная ось профиля проходила через участок профиля, параллельный осям основных валов (см. участок С на рис. 6.18-б).

Определение основного участка (базового элемента) профиля более предпочтительно, чем выбор только основной оси профиля. Это обусловлено тем, что основной участок профиля как бы удерживает заготовку от боковых и вертикальных смещений и влияет на предупреждение скручивания в продольном направлении, в то время как выбор основной оси профиля определяет преимущественно смещение заготовки в вертикальной плоскости.

6.11. Определение углов подгибки

Определение углов подгибки элементов профиля по переходам в значительной степени влияет на качество гнутого профиля, необходимое количество формирующих клеток, а в конечном итоге – на себестоимость готовой продукции.

При **СИ** углы подгибки определены однозначно в п. 3.4 и п. 4.7 работы.

При **МИД** на выбор углов подгибки преимущественным образом влияют следующие основные факторы: 1) величина растягивающих напряжений на кромках подгибаемых элементов профиля; 2) номер технологического перехода и инструмент, при помощи которого осуществляется подгибка; 3) тип профилегибочного станка (межклетьевое расстояние, скорость профилирования).

Несовершенство схем формообразования и неверный выбор углов подгибки при производстве гнутых профилей в условиях ограниченного числа технологических переходов приводит к кромковой волнистости подгибаемых полок, прогибу профиля в вертикальной плоскости и его скручиванию вокруг продольной оси.

На первом этапе определения угла подгибки целесообразно установить предельно допустимый (критический) угол, на который можно подогнуть элемент без образования кромковой волнистости. Аналитически критический угол подгибки можно определить по зависимостям, полученным в п. 3.8 (формула (3.96)). Критический угол также можно определить, основываясь на полученных экспериментальных данных п. 4.10 (рис.4.51). Назначаемый технологом угол подгибки элемента профиля не должен превышать его предельное значение. Однако эти данные могут использоваться лишь как справочные, поскольку экспериментальные данные получены в отсутствие влияния жесткого переднего конца заготовки. Оптимальные углы подгибки следует назначать на основе разработанной модели п. 3.6.

Угол подгибки элемента профиля за один технологический переход представляет собой арифметическую разницу между суммарным углом подгибки на актуальном и предшествующем переходах (рис. 6.19):

$$q_i^{\text{текущ}} = a_i - a_{i-1},$$

где α_i – угол подгибки на актуальном переходе, град; α_{i-1} – угол подгибки на предшествующем переходе, град.

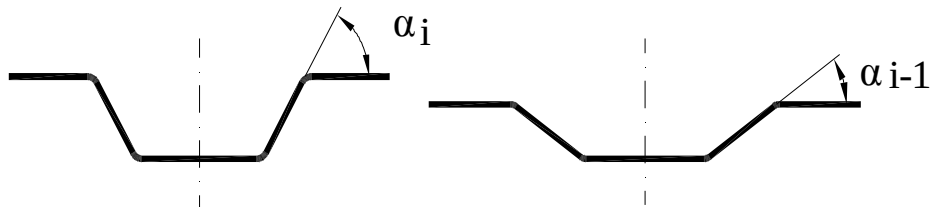


Рис. 6.19. Угол подгибки за один технологический переход

Номер технологического перехода и инструмент, при помощи которого осуществляется подгибка, также существенным образом влияют на выбор угла подгибки [459]. Речь идет о различии приложения сил к подгибаемым полкам со стороны основных и вспомогательных вертикальных роликов межклетьевого проводки (при ее наличии).

Очевидно, что при подгибке профиля основными валками наиболее благоприятные условия гибки будут при меньших значениях угла α с горизонтальной осью профиля ($0 < \alpha < 45$ град.), в то время как в случае подгибки боковым вспомогательным инструментом наиболее благоприятные условия будут при больших значениях угла α ($45 < \alpha < 90$ град.). В связи с этим рекомендуется на предварительных переходах углы подгибки основным формующим инструментом назначать несколько больше, чем на переходах окончательного формообразования. Применение проводок с целью задания дополнительных деформаций на предварительных переходах неэффективно, при необходимости рекомендуется использовать вспомогательные ролики и направляющие линейки только для ориентации заготовки.

Тип станка, в частности, его межклетьевое расстояние также влияет на выбор угла подгибки. При назначении угла подгибки (табл. 6.1) желательно соблюдать следующие соотношения между зоной плавного перехода и межклетьевым расстоянием станка [373, 344]:

$$0.2L_M \leq L \leq L_M, \quad (6.5)$$

где L_M – межклетьевое расстояние станка, мм; L – зона плавного перехода, мм. Выбранные углы подгибки следует проверять по ограничению (3.57).

Таблица 6.1

Рекомендуемые углы подгибки за один переход, град

Тип инструмента	Углы подгибки, град.		
	<i>при толщине материала, мм</i>		
	<i>0.5, 1.0</i>	<i>1.0, 1.5</i>	<i>1.8, 2.5</i>
Основные валки	20÷35	25÷45	15÷30
Вспомогательные ролики	10÷20	10÷15	5÷10
Направляющие планки	5÷15	5÷10	до 5

Отметим, что в немецкой системе CAD «Сорга» [334, 335] число переходов устанавливается по ограничению, аналогичному (3.57), т.е. по условию того, что протяженность зоны плавного перехода не должна превышать величины межклетьевого расстояния. Это также соответствует неравенству (6.5).

6.12. Обеспечение размерной точности поперечного сечения профиля

Обеспечение точности размерных характеристик поперечного сечения профиля приобретает особую актуальность в связи с освоением новых типов размеров профилей для сборных конструкций в строительстве, автомобилестроении и в сфере услуг по отделке интерьера промышленных и гражданских сооружений.

В процессе эксплуатации из-за износа роликовой оснастки размеры поперечного сечения профиля изменяются и выходят за пределы поля допуска, определенного чертежом. Обычно процедура проектирования роликового инструмента предусматривает выполнение калибра по номинальным размерам чертежа профиля. Однако вследствие упругой отдачи реальный линейный размер элемента профиля L увеличивается на величину ΔL (рис. 6.20).

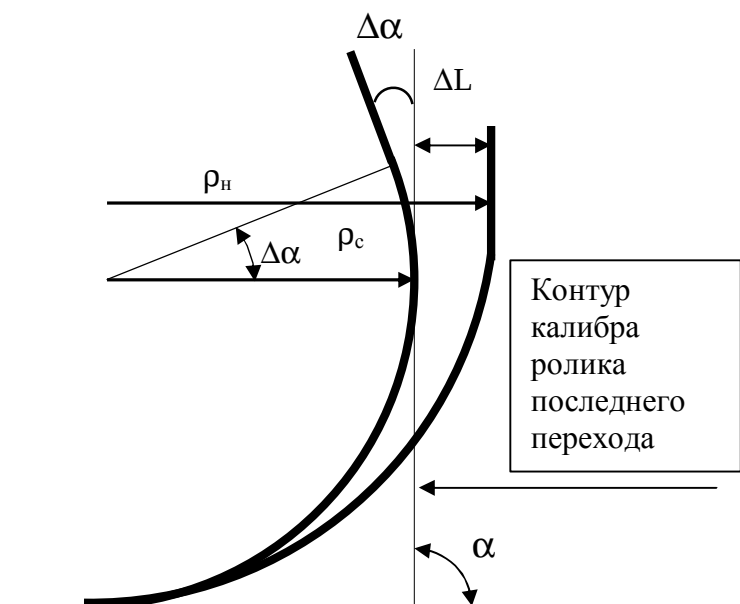


Рис. 6.20. Схема упругой отдачи полки

В работах [460, 313] величина изменения размера определена на основе теоремы Ильюшина о разгрузке [461, 132]:

$$DL = \frac{3 \cdot \frac{\sigma_T}{E \cdot s} \cdot r_n^2}{1 + 6 \cdot \frac{\sigma_T}{E \cdot s} \cdot r_n}, \quad (6.6)$$

где σ_T , E – предел текучести и модуль Юнга материала соответственно, МПа; ρ_n , s – радиус зоны сгиба по нейтральному слою и толщина заготовки соответственно, мм.

С учетом того, что теорема Ильюшина о разгрузке дает удовлетворительный результат только для свободной гибки, введен поправочный коэффициент k для более полного учета условий интенсивного формообразования, например, влияния аксиальных и тангенциальных усилий, приложенных к полкам профиля, а также пластических и анизотропных свойств материала [460]. После перехода от номинального радиуса кривизны срединной поверхности к относитель-

ному внутреннему радиусу r и внесения поправочного коэффициента в формулу (6.6) получена зависимость для вычисления изменений линейных размеров полков профиля в расчете на один угол:

$$DL = \frac{3 \cdot k \cdot \frac{s_T}{E} \cdot (r + 1/2)^2}{1 + 6 \cdot \frac{s_T}{E} \cdot (r + 1/2)} \cdot s, \quad (6.7)$$

где k – коэффициент, определяемый экспериментально.

Связь ΔL с углами подгибки и упругой отдачи определяется соотношением [313]:

$$DL = \frac{Da/a}{1 + Da/a} (r + 1/2) \cdot s, \quad (6.8)$$

где Da , a – углы упругой отдачи и подгибки соответственно.

В работе [281] приведены значения соотношений Da/a и соответствующие им значения внутреннего радиуса зоны сгиба для широкого класса материалов заготовок единичной толщины. Тогда величина ΔL , вычисляемая по формуле (6.8) может рассматриваться как экспериментальная величина $\Delta L^{\exists}$, а коэффициент k в формуле (6.7) – как мультипликативная невязка теоретической величины ΔL^T , вычисляемой по формуле (6.6), и экспериментальной величины $\Delta L^{\exists}$, определяемой формулой (6.8):

$$k = \frac{DL^{\exists}}{DL^T}. \quad (6.9)$$

Формула (6.9) была обработана в среде MathCAD-2000 и Excel-97 и представлена графиком зависимости коэффициента k и величины $m = (\sigma_T/E) \cdot 10^3$ от вида материала (рис. 6.21). Нами приняты характерные значения σ_T/E для

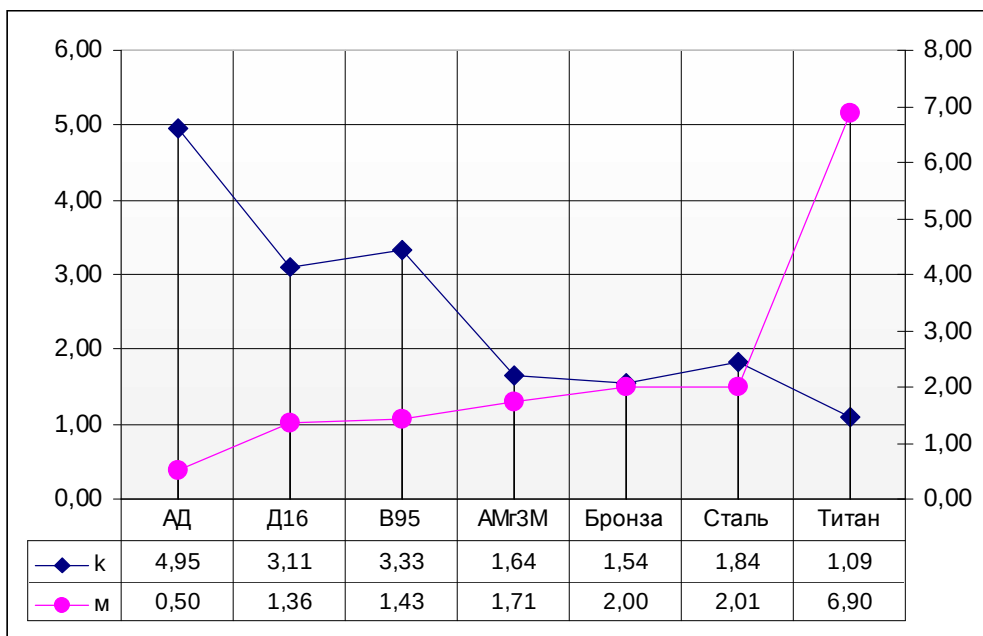


Рис. 6.21. Зависимость коэффициента k от вида материала и его свойств

групп материалов, исходя из их средних значений для отожженного (стали, медь) или закаленного (алюминиевые сплавы) состояния, а также значения параметров, входящих в формулу (6.8), на основании данных работы [281]. При этом следует иметь в виду, что значение σ_T в этом случае будет заниженным. Для материалов в других состояниях надлежит использовать их реальный предел текучести или в рамках специфических схем формообразования и вносить поправку на коэффициент k с учетом всех влияющих факторов (см. ниже обсуждение данного вопроса). Хотя соотнесение значений величины m с различными материалами условно, однако оно позволяет в среднем характеризовать определенные группы материалов и назначать для них соответствующие значения коэффициента k .

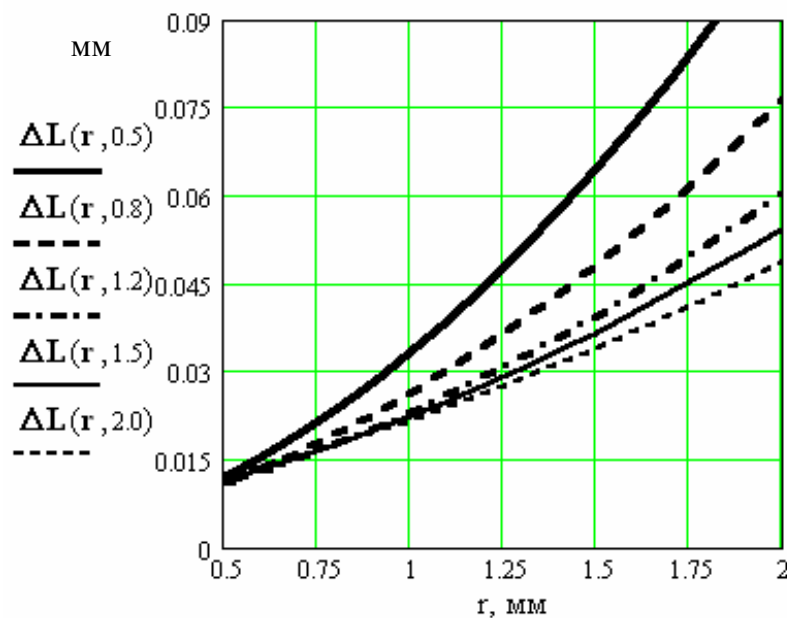


Рис. 6.22. Изменение размеров
полок в расчете на один угол

Рис. 6.22 иллюстрирует зависимость изменения линейного размера элемента профиля от относительного радиусагиба и толщины заготовки для стали в виде $\Delta L = \Delta L(r, s)$ согласно зависимости (6.7). При определении коэффициента k по формуле (6.9) фактически учтено влияние схемы формообразования в отсутствие градиентов напряжений и деформаций в процессе формообразования в продольном направлении, что соответствует гибке заготовки в штампе с применением эластичной среды. При необходимости учета более жесткой схемы достаточно получить экспериментальные значения ΔL для одного материала и по ним скорректировать коэффициент k . Для других материалов коэффициенты k могут быть изменены на величину, пропорциональную относительной величине изменения того же коэффициента для материала, с которым проводились эксперименты.

При проектировании роликовой оснастки надлежит принимать во внимание изменение линейных размеров готового профиля по отношению к калибру пары роликов окончательного формообразования, используя формулу (6.7). Так, следует назначать размеры калибра последней формующей пары роликов с учетом изменения размера профиля на величину ΔL , определяемую по формуле (6.7). Данный подход к проектированию инструмента (рис. 6.23) позволяет выдерживать допуски на линейные размеры поперечного сечения профиля при значительном износе роликов и, следовательно, позволяет существенно увеличить срок службы технологического оснащения.

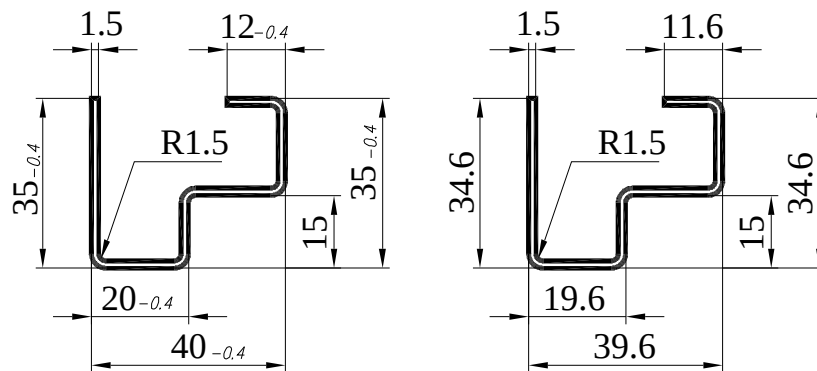


Рис. 6.23. Процедура проектирования инструмента: а) – чертеж профиля; б) – чертеж роликового калибра

При практической реализации вышеуказанного подхода к проектированию оснастки в технологическую схему, реализуемую без торцевого поджатия, следует закладывать так называемое «поднутрение» за счет смещения полок к центральной части профиля на расчетные величины. При реализации гибки с торцевым поджатием размеры калибра можно назначать по нижней границе поля допуска без создания поднутрения [411]. Формула (6.7) позволяет вычислять изменение размеров элементов профиля в расчете на один угол, однако, для периферийных элементов, контактирующих с инструментом своими торцами, размер соответствующего сегмента калибра надлежит задавать по нижней границе поля допуска. Это связано с более высокими значениями контактных напряжений по торцам и, следовательно, с более интенсивным износом в этих местах формующего инструмента. Кроме того, при назначении линейных размеров калибра следует также принимать во внимание изменение линейных размеров самих элементов профиля после снятия нагрузки (выхода из калибра). Дифференцированный подход к учету упругой отдачи надлежит практиковать и в отношении специальных профилей. Для специальных многоэлементных профилей учет пружинения следует осуществлять исходя из схемы формообразования и характера формовки примыкающих к элементу угловых зон. Угловые зоны, не подверженные переформовке в текущем переходе, не следует принимать в расчет.

6.13. Особенности разработки технологии производства специальных профилей

6.13.1. Перфорированные профили

Технология производства длинномерных перфорированных (просечных) профилей, ориентированная на их изготовление в роликах профилирующих машин, может иметь различные варианты сочетаний процессов перфорации и собственно профилирования [420, 344]:

1. Перфорация ленты в штампе – профилирование в роликах.
2. Перфорация ленты в роликах – профилирование.
3. Профилирование ленты – перфорация в штампах (роликах).

Преимущество первого процесса состоит в возможности обеспечения высокой точности размеров пробиваемых отверстий и их расположения. Однако отверстия значительных размеров могут существенно осложнять процесс профилирования в отношении обеспечения размерной точности отверстий и самого профиля: размеры отверстий могут изменяться; ослабление сечения может приводить к поводкам (прогибу, скрутке) или же локальной потере устойчивости (кромковой волнистости, излому полок).

Второй процесс может быть реализован двумя преимущественными способами: 1) перфорацией в роликах перед профилированием (например, в первых клетях на горизонтально плоских участках); 2) комбинированным способом, когда перфорация осуществляется перед собственно профилированием на участках заготовки, подлежащих подгибке, и в срединных клетях на неподгибаемых элементах. В этом случае возможна некоторая диверсификация процесса, например, перфорация в последних клетях, перфорация на наклонных подгибаемых элементах. Однако все комбинации данного процесса связаны с понижением параметров точности изготавливаемого профиля, усложнением технологической оснастки, снижением стабильности технологического процесса.

Перфорация профиля в штампах или роликах после его формообразования хотя и возможна, однако она имеет существенные ограничения: перфорирование возможно лишь на открытых участках (преимущественно донная часть профиля или горизонтальные полки). В отличие от первых двух процессов здесь не предусматривается своего рода калибровка профиля в роликах, которая сглаживает мелкие дефекты типа локальной вытяжки вблизи отверстия при притуплении матриц и пуансонов, поводок, возникающих вследствие перераспределения остаточных напряжений и т.д.

Хотя на практике применяются все три варианта реализации технологии, все же предпочтение следует отдавать процессу, предусматривающему предварительную пробивку отверстий и последующее профилирование [420].

6.13.2. Профили с элементами жесткости

В качестве примера рассмотрим особенности разработки технологии С-образного профиля (рис. 4.68, табл. 4.2, п. 4.13) с периферийными элементами двойной толщины. Схемы формообразования профиля на исходном и окончательном этапах разработки технологии представлены на рис. 6.24, а соответ-

вующее им распределение углов подгибки элементов профиля по переходам, полученное на основании модифицированной методики работы [375], сведено в табл. 6.2.

В исходной схеме формообразования (рис. 6.24-а) периферийные элементы подгибают в первых четырех переходах (включая нулевую пару роликов подающей клетки) по схеме $40^\circ-90^\circ-160^\circ-235^\circ$ с максимальным углом подгибки за переход 75° ; рифт формируют во втором переходе. С целью снижения затрат на отработку технологии использовали заготовки без покрытия. При профилировании горизонтальные полки имели кромковую волнистость по выходу из калибра последнего перехода с режимом подгибки со 140° до 180° .

Таблица 6.2

Углы подгибки элементов профиля по переходам

Элемент профиля	Углы подгибки элементов профиля в градусах						
	Переход						
	0	1	2	3	4	5	6
Исходная схема формообразования							
1	10	10	20	30	45	75	90
2	15	20	40	55	90	140	180
3	40	90	160	235	270	320	360
Окончательная схема формообразования							
1	10	20	30	45	75	80	90
2	20	40	55	90	140	175	180
3	90	160	235	270	320	350	360

В этой связи исходная схема формообразования была подвергнута пересмотру: нулевая пара была исключена, а перед окончательным переходом была введена дополнительно пара, «смягчающая» режим подгибки горизонтальной полки (рис. 6.24-б, см. также табл. 6.2).

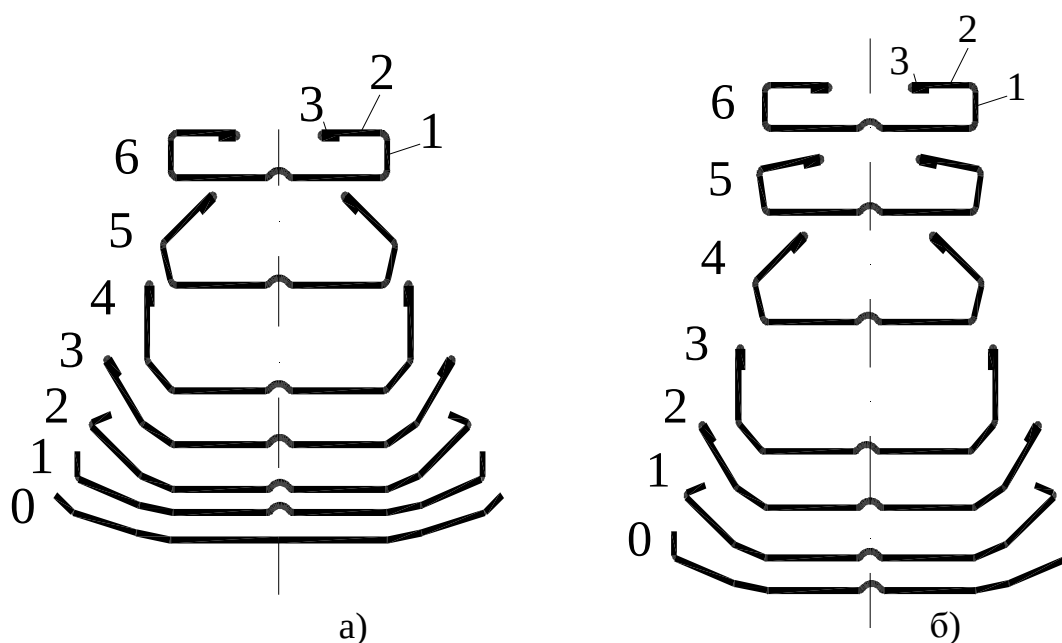


Рис. 6.24. Схемы формообразования профиля: а – исходная; б – окончательная

Для установления оптимального угла наклона горизонтальной полки в предчистовом переходе проводили экспериментальные исследования с постепенным изменением угла наклона образующей конуса ролика с шагом в 2 градуса и последующей формовкой заготовки.

Результаты исследования приведены на рис. 6.25, где по оси ординат указана амплитуда волны кромки; экспериментальные точки получены осреднением пяти замеров амплитуды волны. Отсюда видно, что оптимальным можно принять угол в диапазоне 5 – 7 градусов.

Этому обстоятельству можно дать следующее объяснение: при большом угле подгибки в области калибра заготовка и ее периферийные участки пребывают в пластическом состоянии. Контакт ролика с периферийным участком заготовки вызывает его продольное удлинение ввиду различия скорости движения заготовки и линейной скорости поверхности ролика, контактирующего с торцом заготовки, (фактически, из-за наличия «торможения»).

Некомпенсированная деформация (приращение длины) периферийного участка приводит к возникновению кромковой волнистости по выходу профиля из калибра. При малой степени «догибки» происходит лишь изменение угла подгибки, а пластическое состояние характерно только для угловой зоны, но не для всей подгибаемой полки. Генеалогия кромковой волнистости и соответствующие расчеты потери устойчивости элементов профиля приведены в работе [162]. Выбор углов подгибки при проектировании технологической оснастки следует производить с учетом плавности траекторий движения точек заготовки, а также с учетом критериев потери устойчивости элементов профиля.

Измененная схем формообразования (рис. 6.24б, см. также табл. 6.2) позволила получить профиль без кромковой волнистости его горизонтальных полок. Профилирование заготовки с покрытием выявило нарушение последнего с наружной стороны зоны сгиба у основания элемента двойной толщины, что связано с практически нулевым радиусомгиба, а также наличием контакта зоны сгиба с инструментом. На внутренней грунтованной поверхности заготовки наблюдались микроскладки, хотя толщина покрытия не превышает 10 мкм.

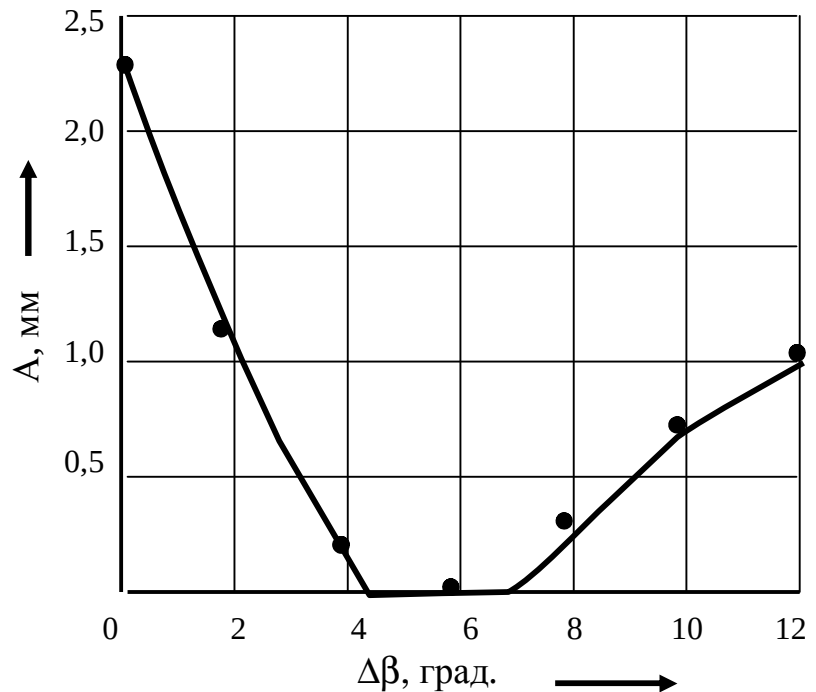


Рис. 6.25. Зависимость кромковой волнистости от угла наклона образующей конического участка ролика

Угол подгибки (180°) периферийного элемента определяет в силу формулы Е.А. Попова внутренний относительный радиус [273]:

$$\frac{r_B}{s} = 0,5 \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \Rightarrow r_B \rightarrow 0.$$

В то же время минимально допустимый радиусгиба для материала подложки из стали 08кп составляет величину порядка 0,2 мм [5]. С другой стороны, покрытие заготовки (акрилсиликоновая эмаль АС-1171) по данным, например, ООО «Лакокраспокрытие» допускает изгиб заготовки на радиус, соизмеримый с толщиной подложки. В этой связи с заказчиком было согласовано выполнение бульбообразного утолщения основания элемента двойной толщины с радиусом 0,2 мм, поскольку данное преобразование конструкции профиля не вступает в противоречие с его функциональным назначением.

Для предотвращения контакта зоны сгиба элемента двойной толщины с буртом формующего ролика на первых переходах применяли калибры с дополнительными коническими участками (рис. 6.26-в). Другие схемы замыкания калибров имеют определенные недостатки. Так, при вертикальном положении линии разреза калибра (рис. 6.26-а) зона сгиба контактирует с боковой посадочной поверхностью нижнего ролика, а при горизонтальном ее положении (рис. 6.26-б) происходит «закусывание» профиля в месте посадки.

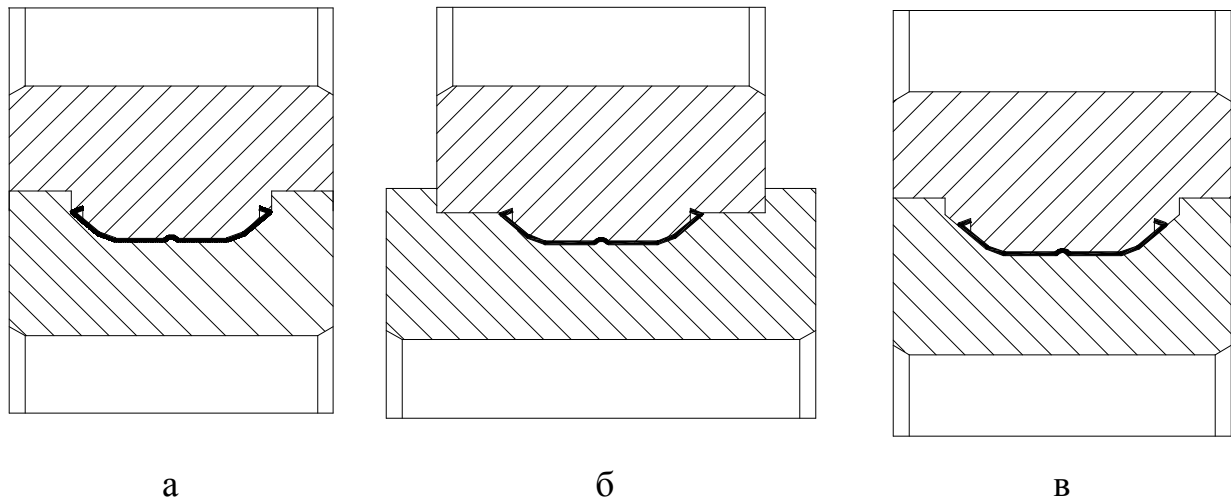


Рис. 6.26. Калибры роликов: а, б – с вертикальной и горизонтальной линией разреза соответственно; в - с дополнительными коническими участками

На пятом и шестом переходах предусмотрены участки «высвобождения» (рис. 6.27-а и 6.27-б). При отработке технологии аналогичных профилей из-за наличия участков высвобождения иногда наблюдалось фланирование заготовки. В таком случае на верхнем ролике выполняют технологические уклоны (рис. 6в), которые также дают положительный эффект, хотя в этом случае контакт заготовки и инструмента имеет место. Разумеется, поверхность уклонов должна быть не ниже 8 класса чистоты.

При проектировании оснастки линию равенства скоростей верхнего и нижнего формующих роликов следует располагать как можно ближе к элемен-

ту двойной толщины, однако, это пожелание является конкурирующим по отношению к обеспечению условия предотвращения кромковой волнистости. В процессах многопереходной гибки, в отличие от практикуемого нами метода интенсивного деформирования, уменьшение эффекта скольжения (касательных напряжений) возможно за счет использования привода только нижних валов профилегибочного стана. При этом скорости профилирования не должны, как правило, превышать 30 м/мин, хотя известны случаи производства профилей несложного сечения из материала с лакокрасочным покрытием со скоростью до 48 м/мин на 20-и клетьевом стане. Требование ограничения скорости связано с высокой чувствительностью лакокрасочного покрытия к

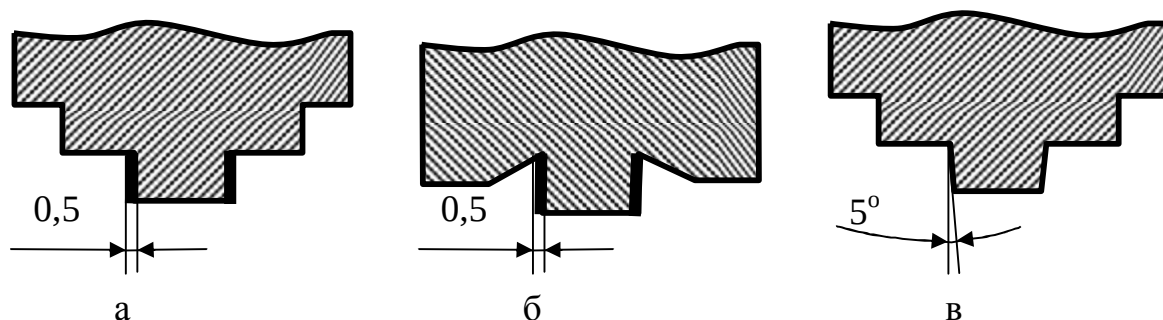


Рис. 6.27. Способы снижения касательных контактных напряжений:
а, б – созданием зон «высвобождения»; в – выполнением уклонов

ударным воздействиям.

Переформовка профиля также является весьма нежелательным явлением с точки зрения сохранности покрытия. Для выбранной схемы формообразования (см. рис. 6.24-б) данное условие соблюдается, поскольку протяженность зон плавного перехода во всех переходах (табл. 6.3) меньше межклетьевого расстояния профилегибочного станка. При проектировании оснастки и определении углов подгибки по переходам [375] во избежание переформовки следует производить оценку протяженности зон плавного перехода периферийных элементов с использованием модели работы [365].

Таблица 6.3

Протяженность зон плавного перехода (ЗПП)

Зона формо-изменения:	Протяженность ЗПП, мм							L _м , мм
	Номер перехода							
	0	1	2	3	4	5	6	400
Полного	35	95	92	205	206	115	120	
Наиболее интенсивного	9	19	12	123	130	45	37	

Схема формовки в данной технологии предусматривает плавное изменение радиусовгиба по переходам между базовым элементом (дно профиля) и подгибаемыми полками (рис. 6.28) во избежание значительных контактных напряжений, характерных для схемы формовки с постоянным радиусом (см. п.

6.8). Примерно такой же характер изменения радиусовгиба присущ и другим технологиям производства полужакрытых профилей иных типоразмеров из заготовок с покрытием [348]. Профили из материалов без покрытия методом интенсивного деформирования изготавливают обычно по схеме жесткого задания радиуса на первых переходах.

Что касается рифтов, то одиночные мелкие рифты (высотой, соизмеримой с толщиной заготовки) при интенсивном деформировании могут также выполняться на первых переходах, в то время как исполнение глубоких и множественных рифтов следует распределять по переходам. Формовка рифтов приводит к боковой утяжке материала и резкому изменению жесткости элементов профиля, что существенно влияет на режимы профилирования, в частности, режим подгибки элементов профиля.

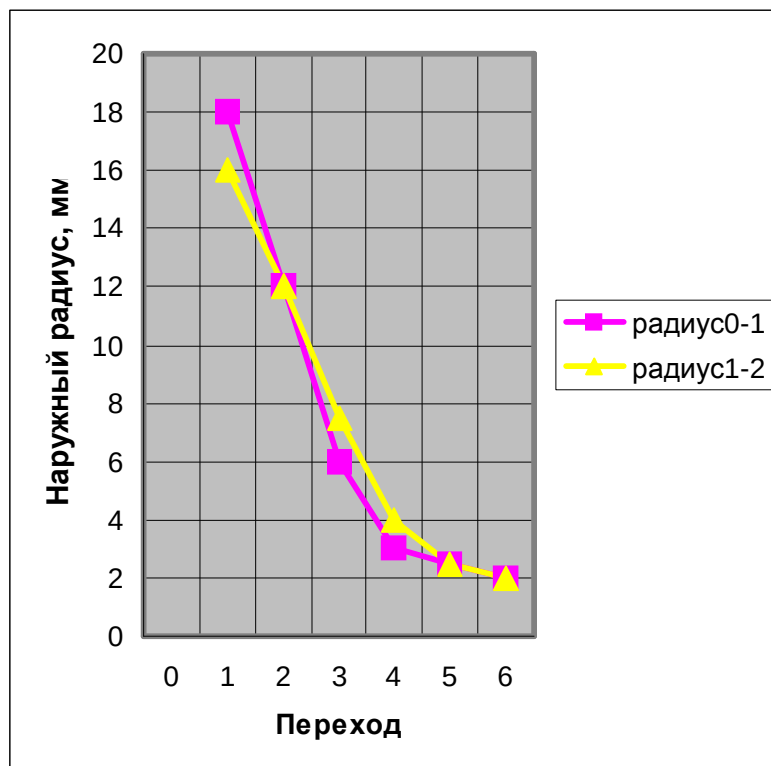


Рис. 6.28. Изменение наружного радиуса заготовки между элементами профиля

При изготовлении профилей с покрытием желательно применение смазок, например, хлопкового масла. Однако данное требование для профилей с толщиной стенки менее 1 мм не является настоящим ввиду малости контактных напряжений.

При изготовлении специальных профилей с элементами жесткости (рис. 6.29) в схемах формообразования (рис. 6.30) следует учитывать особые требования к траекториям движения реперных точек элементов и изменению локальных жесткостей элементов [344].

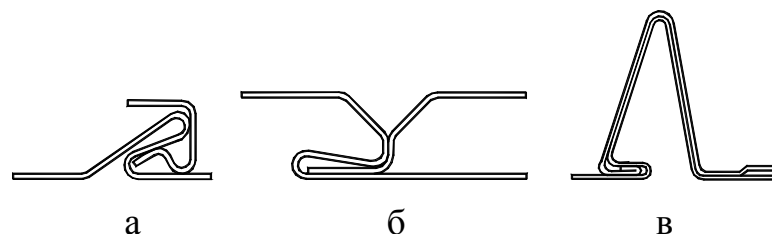


Рис. 6.29. Замковые соединения специальных профилей: а — сайдинг; б — софит; в — афтофальц

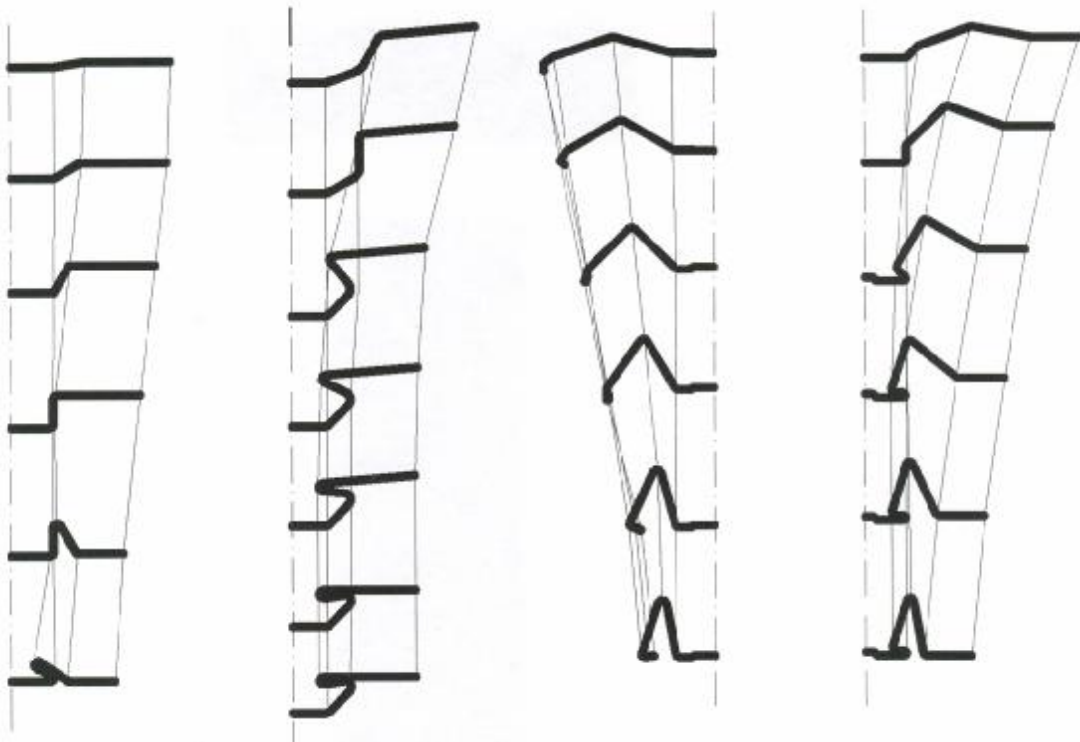


Рис. 6.30. Формообразование петельных элементов на профилях:
а – сайдинг; б – софит; в, г – внутренняя и внешняя части замка автофальца соответственно

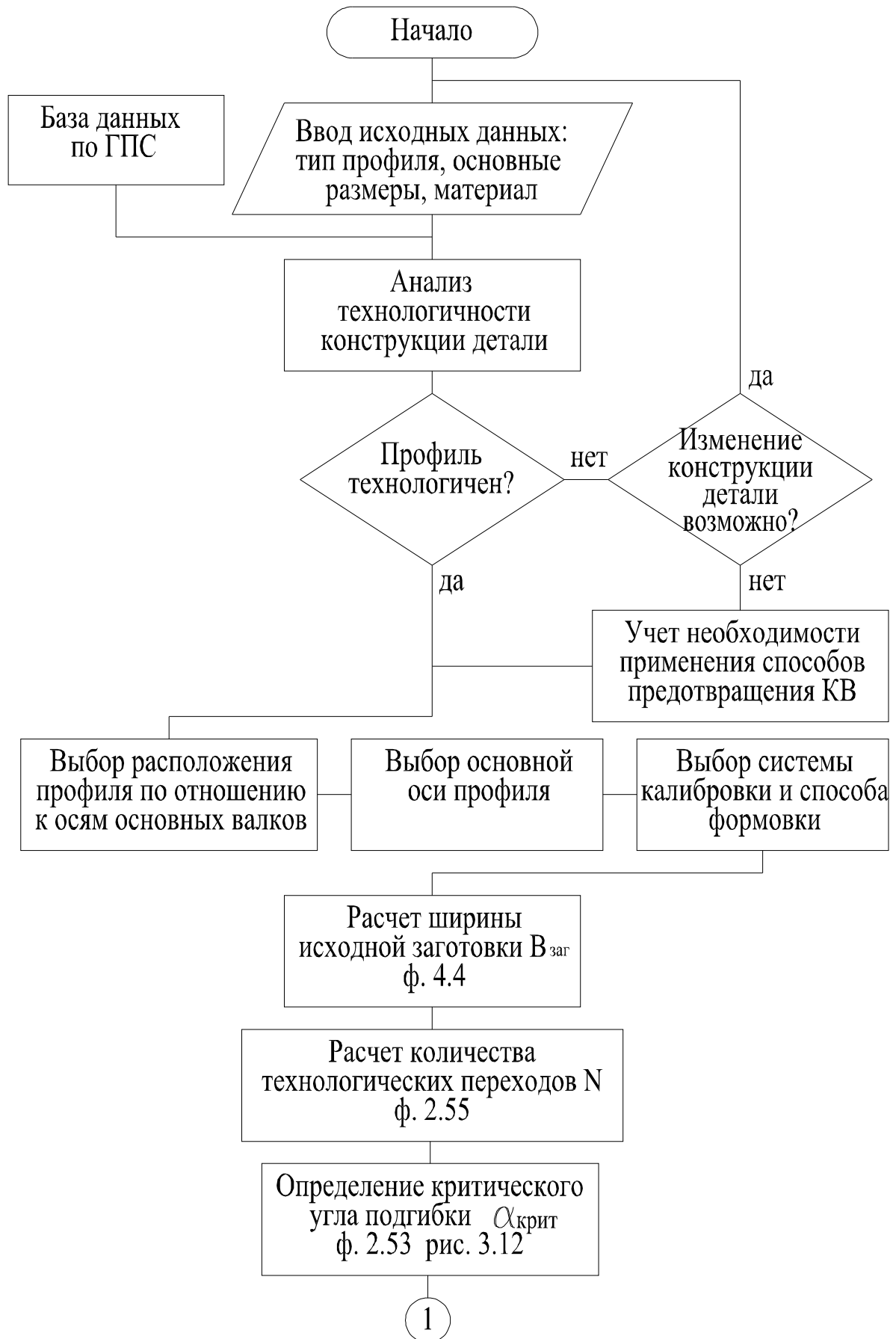
Классы элементов жесткости и обсуждение технологии их формообразования приведены в п.2.4. Каждый класс элементов жесткости на профилях специальной номенклатуры, изготавливаемой по схемам, отличным от схем производства типовых профилей, представляет собой предмет отдельного исследования с учетом наличия перфорации, покрытия заготовки и т.п.

6.14. Алгоритм разработки технологии производства профилей МИД

Процедуры проектирования технологии **СИ** достаточно подробно изложены в работах [368, 216].

Разработка технологии **МИД** для группы профилей различных типов под заказ связана с учетом технических и экономических факторов. На рис. 6.31 приведен укрупненный алгоритм разработки технологии изготовления тонкостенного профиля на основе метода интенсивного деформирования, охватывающий все этапы проектирования и принятия решений до стадии изготовления оснастки. Алгоритм эксплуатируется на предприятиях-разработчиках г. Ульяновска и предусматривает определенную последовательность этапов разработки технологии, выраженной в соответствующих совокупностях его блоков. Краткое описание этапов разработки приведено ниже (ссылки на модели – по работе [344]).

На первом этапе после ввода (получения) данных об изготавливаемом профиле проводят анализ его технологичности [344] (см. п.6.2).





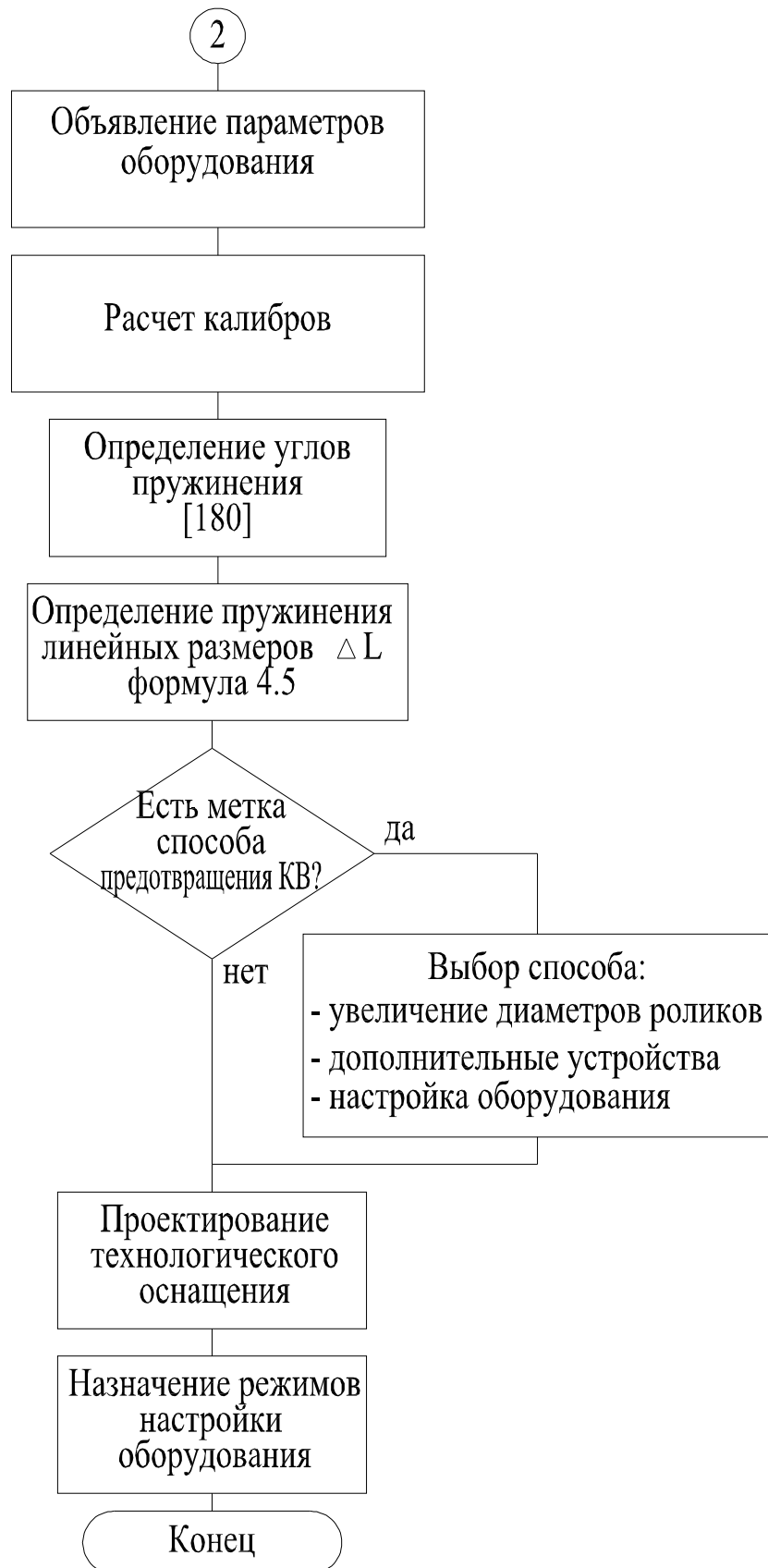


Рис. 6.31. Алгоритм разработки технологии изготовления профиля

На втором этапе определяют расположение профиля в роликах по переходам, устанавливают систему калибровки и способа формовки и проводят расчеты числа переходов, схем формообразования и т.д. с принятием соответствующих технических решения при отклонениях от стандартного процесса проектирования.

На следующем этапе производят выбор подходящего станка, а в случае необходимости создания нового оборудования производят расчет его основных параметров.

На очередном этапе выполняют расчет калибров и параметров пружинения [344] (см. п. 6.12). На заключительном этапе в случае необходимости производят выбор способа предотвращения кромковой волнистости [162, 168, 344]. Приведенный алгоритм включает практически все полученные в работе модели и при более подробной разработке и формализации некоторых проектных процедур может быть использован в системе автоматизированного проектирования технологии метода интенсивного деформирования [357].

6.15. Применение межклетьевых проводок

В алгоритме разработки технологии (рис. 6.31) при определенных условиях возможно использование межклетьевых проводок, которое следует рассматривать лишь как технический паллиатив, а не радикальное средство предотвращения дефектов. Кроме издержек изготовления проводок, последние существенно осложняют настройку процесса и рекомендуются к использованию лишь при нехватке, например, одного перехода для изготовления профиля при ориентации на определенный тип станка. Базовая технология производства типовых профилей не предусматривает использования межклетьевых проводок, а качество профиля обеспечивается аккуратным применением разработанных моделей и технологических рекомендаций. На рис. 6.32 приведены два типа межклетьевых проводок. Для производства особо широкополочных профилей и профилей с покрытием невысокой прочности нами разработаны два вида проводок: межклетьевая проводка (рис. 6.33-а) [170] и торцовая проводка (рис. 6.33-б) [462, 344].

Межклетьевая проводка (см. рис. 6.33-а) применяется для придания поперечной кривизны (предотвращения кромковой волнистости) и догибки полки профиля 1 с помощью

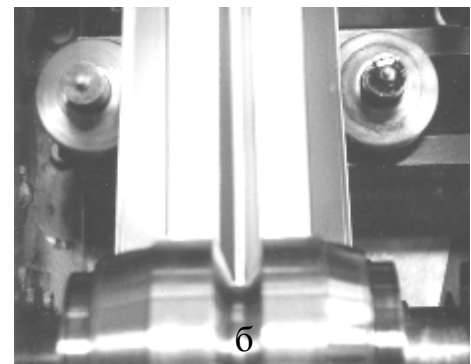
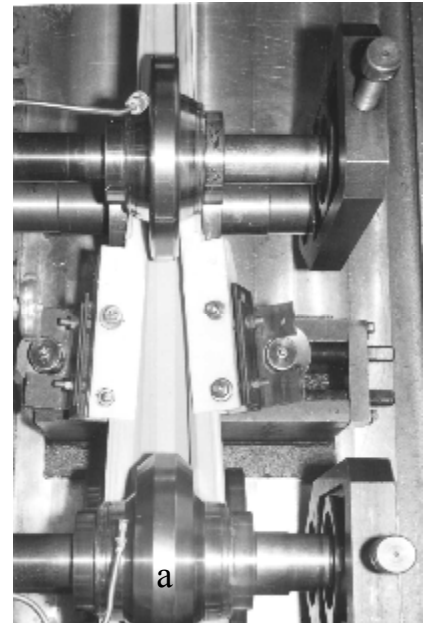


Рис. 6.32. Межклетьевые проводки: а) – скольжения; б) – качения

роликов 7, установленных на осях, жестко укрепленных на ползуне 5. Ползун 5 имеет возможность позиционирования вдоль направляющей 6, шарнирно соединенной со стойкой 8, с помощью винта 3, замкнутого на направляющую 6 через поперечину 2. В свою очередь поперечина 2 шарнирно соединена с натяжкой 4, имеющей возможность поворота и фиксации в дисковой головке с широким пазом стойки 8. Регулировку стойки по высоте по отношению к поверхности рабочего стола станка осуществляют через прокладки. Стойка крепится к рабочему столу станка двумя винтами через отверстия в основании стойки межклетьевого проводки.

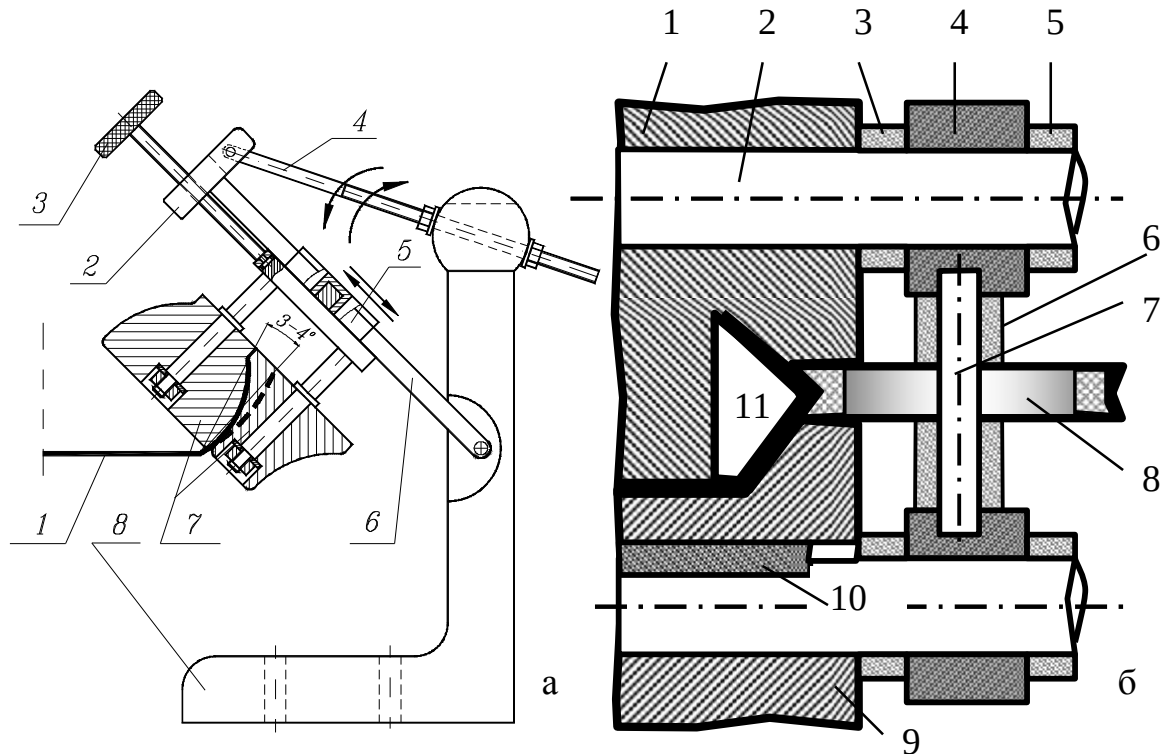


Рис. 6.33. Проводки профилигибочного станка ГПС:
а) – межклетьева проводка; б) – торцовая проводка

Торцовая проводка предназначена для удержания зоны сгиба или осуществления подгибки многоэлементной полки полузакрытого или закрытого профиля с покрытием. На рис. 6.33-б изображены: 1 – верхний ролик; 2 – вал; 3, 5, 6 – дистанционные втулки; 4 – поводковая опора; 7 – ось; 8 – замыкающий ролик; 9 – нижний вал; 10 – шпонка; 11 – заготовка. Варианты исполнения и другие детали по установке и работе устройства приведены в работах [462, 463].

На практике применяются также роликовые проводки (нажимные ролики), исполненные по схеме, предложенной в работе [225] для преднамеренного придания профилю продольной кривизны.

6.16. Условия замыкания калибров формирующих роликов

Особенности интенсивного формообразования [38, 344] (см. также разд. 1) не позволяют полностью заимствовать схемы традиционного профилирования и конструкцию гибочных роликов (см. п. 1.6). Так, изготовление профилей

из материалов с покрытием часто сопровождается нарушением последнего на периферийных участках в местах замыкания роликовых калибров при калькировании технологических решений с традиционного профилирования. Нарушение целостности покрытия происходит вследствие неблагоприятных условий при заходе профиля в калибр (ранний контакт буртов роликов с заготовкой в предосевой плоскости роликовой пары, сопровождаемый изгибом заготовки и высокими контактными напряжениями, закусыванием кромки и др.), связанных со схемами замыкания калибров. При отработке технологии приходится дорабатывать технологическое оснащение или даже заменять его, что приводит к повышению уровня прямых материальных затрат, трудоемкости отработки технологии и увеличению сроков ее освоения. Указанные проблемы можно отчасти решить путем надлежащего выбора схемы замыкания роликовых калибров.

Для анализа условий замыкания калибров при горизонтальном расположении роликов предложен классификатор (рис. 6.34), основанный на следующих параметрах классификации: 1) тип замыкания; 2) тело врезания калибра; 3) вид замыкания (по расположению линии разъема калибра); 4) вид бокового взаимного базирования; 5) вид базирования смыкания калибров [462]. Основываясь на более, чем двадцатилетней практике разработки технологии интенсивного формообразования гнутых профилей, также сформулированы требования к роликовой оснастке, относящиеся преимущественно к условиям замыкания роликовых калибров, однако не исчерпывающих всех требований к формирующей оснастке: 1) технологическая пригодность (функциональность); 2) предупреждение аварийных ситуаций (закусывание заготовки, выкрашивание ролика, схватывание и т. д.); 3) обеспечение взаимного базирования роликов по вертикальным поверхностям; 4) минимальное число поверхностей базирования; 5) обеспечение базирования смыкания роликов; 6) согласование контуров роликов (галтелей и скруглений); 7) единообразие замыкания калибров и торцевого базирования роликов во всех переходах; минимальный расход металла на изготовление оснастки; 8) минимальная трудоемкость обработки заготовки ролика.

Проведен анализ классификатора (рис. 3.34) с точки зрения сформулированных выше требований. Прямое замыкание роликов предусматривает непосредственный контакт нижнего и верхнего роликов, в то время как замыкание через промежуточный элемент (блок 2) предполагает наличие неподвижной оправки или подвижного элемента, например, тела вращения (блок 2.1.1; рис. 6.33-б). Замыкающий элемент в виде тела вращения с полиуретановым бандажом является эффективным средством предотвращения нарушения покрытия заготовки в месте сгиба или вблизи кромки заготовки.

Однако замыкание калибра по месту расположения кромки заготовки связано с ухудшением ее захода в калибр, поскольку в предосевой плоскости кромка приходит в контакт с нижней плоскостью замыкающего ролика – возможно ее закусывание. Поэтому основное назначение данного вида замыкания – удержание угловой зоны при изготовлении открытых профилей с подгибкой периферийных элементов во внутрь. В случаях формообразования профилей из материала с покрытием при слабой адгезии последнего и подложки, этот вид замыкания часто бывает единственно возможным для обеспечения надле-

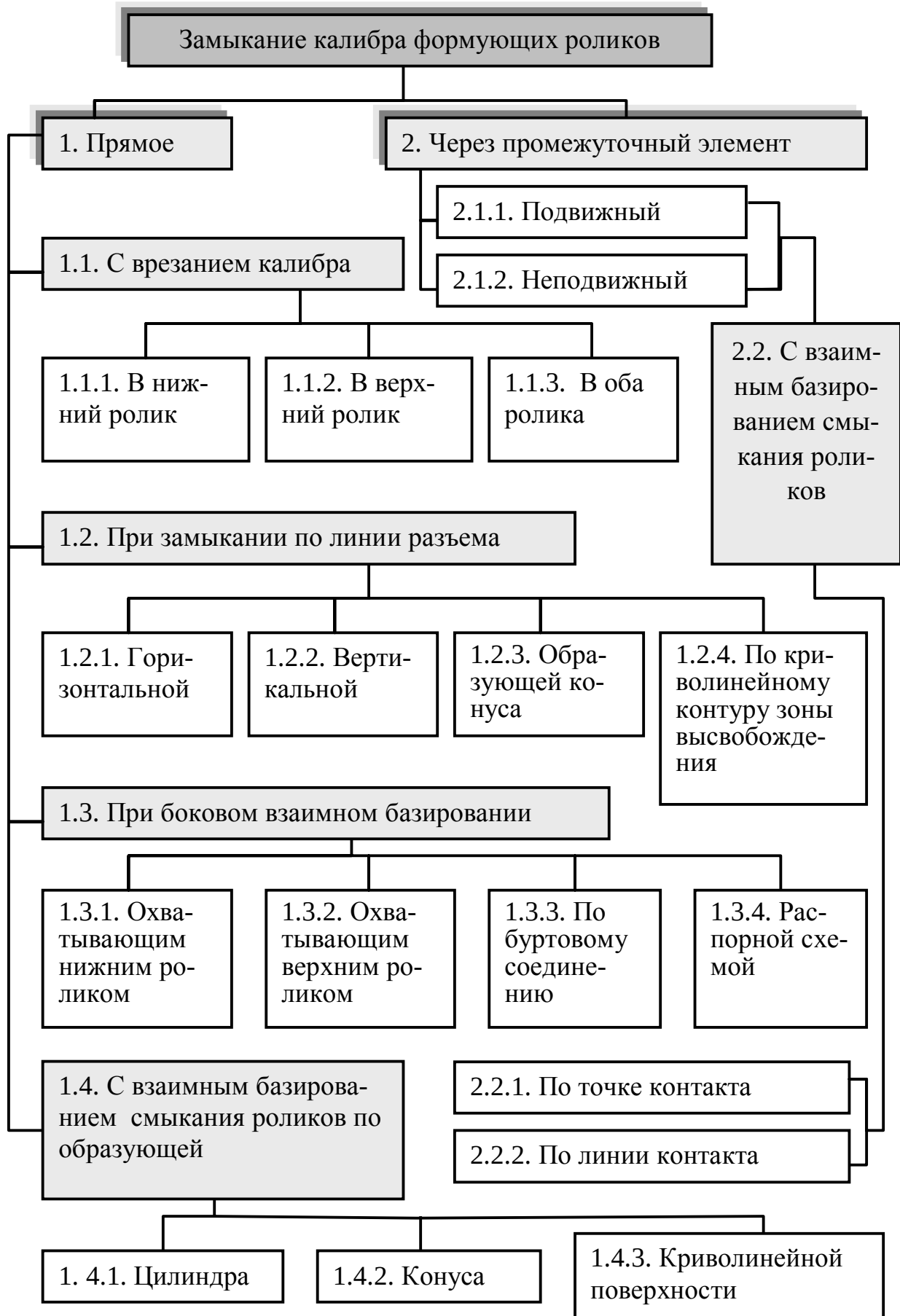


Рис. 6.34. Классификатор замыканий роликового калибра

жащего качества профиля. Базирование смыкания на рис. 6.33-б осуществляет-

ся по прямой линии (соприкосновение цилиндра и плоской торцевой поверхности замыкающего ролика) (блок 2.2.2), хотя возможно и базирование смыкания посредством точечного контакта (блок 2.2.1) путем выполнения скругленного бурта на торцевой поверхности замыкающего ролика 8 (см. рис. 6.33-б).

Замыкание калибра неподвижной оправкой можно осуществлять в случае необходимости воздействия на заготовку в межклетьевом пространстве (например, для предотвращения кромковой волнистости полки профиля) с вводом ее непосредственно в калибр.

Рассмотренные виды замыкания калибра через промежуточный элемент полностью удовлетворяют требованиям 1, 3, 4, 7 к роликовой оснастке, однако другие требования не выполняются, за исключением, может быть, требования 8, согласно которому боковое базирование осуществляется единообразно дистанционными втулками. Следует иметь в виду, что данный вид замыкания калибра является специфическим и некоторые из требований, изложенных выше, для него не вполне приложимы. Разумеется, введение дополнительных элементов технологического оснащения повышает стоимость технологии и, как следствие, цену конечного продукта.

При прямом замыкании калибра возможны несколько видов врезания его в формирующий инструмент (блоки 1.1.1 – 1.1.3). Врезание калибра в нижний ролик (рис. 6.35-а) хотя и приемлемо для производства профилей из материалов без покрытия, но не является оптимальным при производстве профилей из материала с покрытием: перед входом в калибр на заготовку вблизи кромки действует сосредоточенная сила (ввиду точечного контакта) со стороны скругленной ступеньки нижнего ролика и создает значительные контактные напряжения. В этой связи, такое замыкание не удовлетворяет критерию функциональности 1, в то время как другие требования могут выполняться. Врезание калибра в верхний ролик (рис. 6.35-б) лишено указанного недостатка и широко применяется при интенсивном формообразовании. Врезание калибра в оба ролика (рис. 6.35-в) несет в себе недостатки врезания в нижний ролик, а кроме того, требование 7 диктует скругление кромок ступенек на обоих роликах во избежание выкрашивания, что приводит к проблеме закусывания заготовок с толщиной менее 0,8 мм. Для заготовок толщиной более 2 мм из сталей без покрытия этот вид врезания является приемлемым. Трудоемкость изготовления ролико-

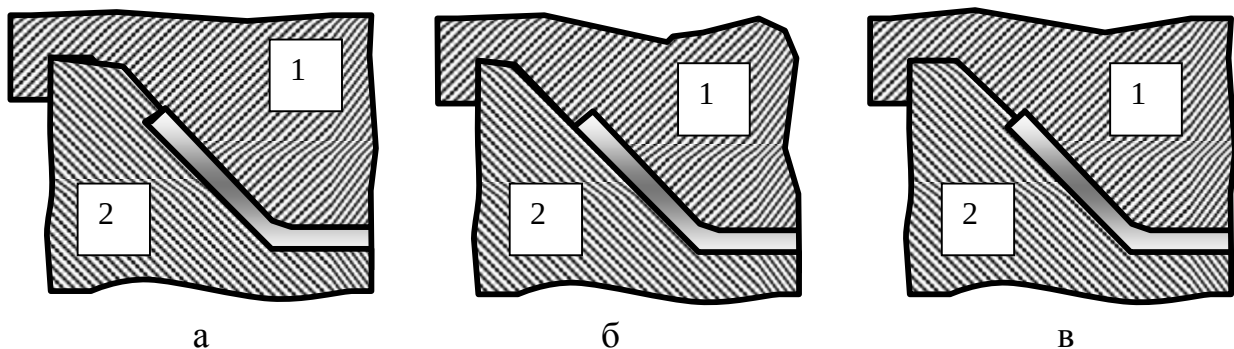


Рис. 6.35. Виды врезания калибра: а – в нижний ролик 2; б – в верхний ролик 1; в – в оба ролика

вой пары с врезанием калибра в оба ролика несколько увеличивается по сравнению с другими его видами. Другие же технологические требования могут быть удовлетворены.

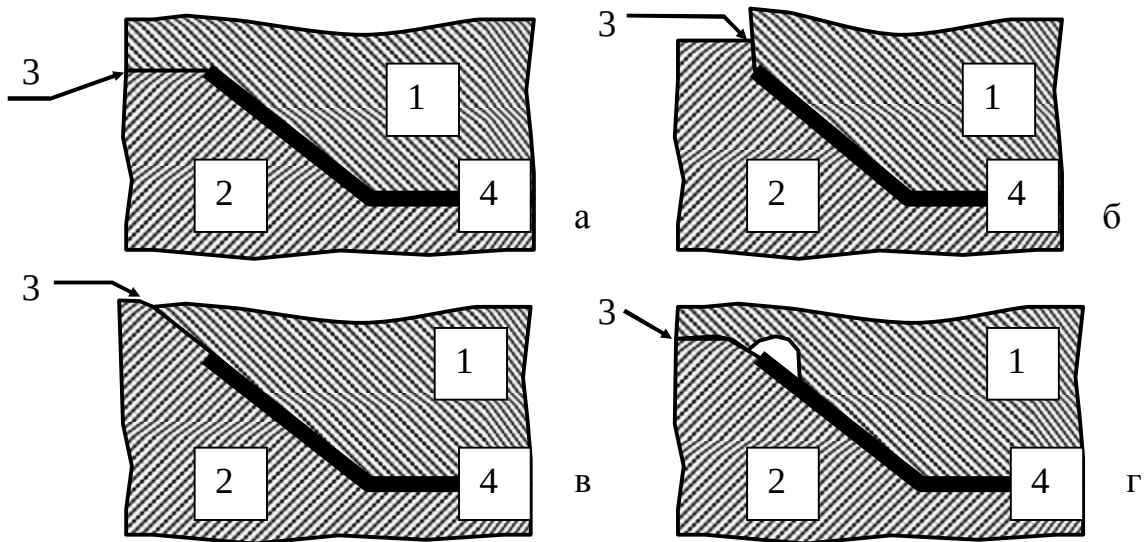


Рис. 6.36. Замыкание калибра по виду линии разреза: а - горизонтальная; б - вертикальная; в - образующая конуса; г - кривая; 1 - верхний ролик; 2 - нижний ролик; 3 - линия разреза; 4 - заготовка

Замыкание калибра по отношению к виду линии его разреза представляется вариантами, отраженными в блоках 1.2.1 – 1.2.4. При горизонтальном расположении линии разреза (рис. 6.36-а) в верхнем ролике (при врезании в него калибра) необходимо предусматривать кольцевые участки с образующей, параллельной поверхности торца заготовки, что создает концентраторы напряжений и может приводить к выкрашиванию материала ролика. Аналогичная проблема возникает и при врезании калибра в нижний ролик. При изготовлении профилей с толщиной более 2 мм и приложении значительных торцевых сил может происходить пластический «скос» кромки, приводящий к появлению заусенца. Вертикальное расположение линии разреза калибра (рис. 6.36-б) предпочтительнее применять на первых переходах в связи с меньшим приращением «стеснения» в расчете на один градус угла подгибки и близким к вертикальной плоскости положением поверхности торца заготовки. Кроме того, на первых переходах практически не применяют торцевое поджатие, что также является благоприятным фактором для процесса формоизменения.

На последних переходах замыкание калибра по вертикальной линии разреза приводит к нежелательному пластическому изгибу периферийного элемента в области, примыкающей к торцу, в связи большой степенью «стеснения» заготовки, а для осуществления торцевого поджатия приходится предусматривать так называемый «зубчатый упор» в виде конического ободка, подверженный выкрашиванию при толщине заготовки более 2 мм. Кроме того, контакт вертикального участка ролика и заготовки при локальном изгибе последней приводит к значительным контактным напряжениям и повреждению покрытия. При изготовлении тонкостенных профилей (до 1 мм толщиной) указанные проблемы несколько сглаживаются.

Замыкание калибра по образующей конуса (рис. 6.36-в) с точки зрения функциональности является предпочтительным, поскольку в данном случае устраняются недостатки схемы рис. 6.36-б: отсутствует изгиб заготовки вблизи торцевой зоны, контактные напряжения уменьшаются.

Замыкание калибра по кривой линии (рис. 6.36-г) в некоторых случаях может быть оптимальным с точки зрения функциональности, однако сложность выполнения криволинейного контура с жесткими допусками создает проблемы в изготовлении технологической оснастки и на практике применяется исключительно редко.

Из рассмотренных схем только базирование по вертикальным поверхностям при их минимальном числе и минимальном расходе материала с минимальной трудоемкостью обработки заготовки ролика (требования 2, 3, 9 и 10) является оптимальной. Указанные требования являются конкурирующими по отношению к требованию функциональности. Разумным компромиссом в этом случае может быть схема замыкания калибра с линией разъема, выполненной в виде образующей конуса с последующим взаимным базированием по вертикальным поверхностям (блок 1.3), отстоящим от торцов заготовки на величину, равную перемещению «стеснения» в текущем переходе. Другие требования к условиям замыкания могут быть выполнены.

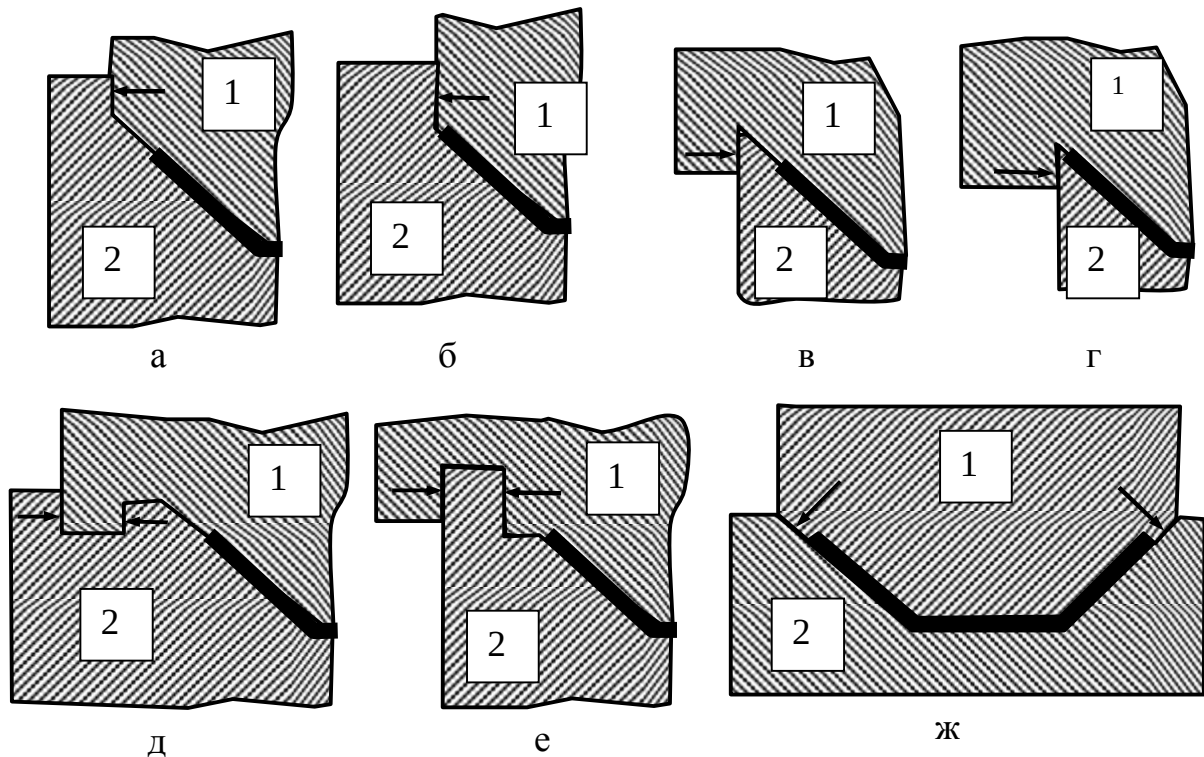


Рис. 6.37. Боковое взаимное базирование: а,б – охватывающим нижним роликом 2; в, г – охватывающим верхним роликом 1; д – буртом верхнего ролика; е – буртом нижнего ролика; ж – распорной схемой

В традиционном профилировании осевое базирование роликов клетки можно осуществлять с помощью дистанционных втулок, в то время как при интенсивном деформировании необходимо применять боковое взаимное базирование роликов (блок 1.4) для обеспечения достаточной точности расположе-

ния оси профилирования при общем базировании одного из роликов пары по торцевой опорной поверхности бурта вала. С точки зрения удовлетворения условиям 2, 3, 8, 9, 10 замыкания калибра идеальными видами базирования можно было бы считать схемы «б» и «г» рис. 6.37, однако, как показано выше, они не всегда являются благоприятными для реализации технологии, в частности, схема «г» создает встречное движение торца бурта верхнего ролика и торца заготовки, что приводит к «развалу» заготовки, ее изгибу в межклетьевом пространстве. Схема «а» при надлежащем выборе длины конической образующей [464] является наиболее приемлемой с учетом всех конкурирующих требований, хотя в этом случае имеется две поверхности базирования. Схемы «д» и «е» на рис. 6.37 хотя и возможны, однако они не удовлетворяют требованиям 3, 9, 10. Понятно, что наличие пяти поверхностей базирования (две из них вертикальных) только с одной стороны ролика создает значительные проблемы в обеспечении сопряжения поверхностей с учетом погрешностей их обработки.

Распорная схема замыкания (рис. 6.37-ж) может быть признана приемлемой для первых и средних переходов, а на последних переходах неизбежно возникает необходимость применения других схем взаимного базирования в связи со значительными горизонтальными перемещениями кромки и затруднением центрирования заготовки. В этом случае остаются невыполненными требования функциональности и единообразия замыкания и базирования по всем переходам.

Взаимное базирование смыкания роликов (обеспечение равномерного зазора по ширине калибра (блок 1.4)) может осуществляться по образующим цилиндрических, конических или криволинейных поверхностей. Базирование смыкания роликов по образующим криволинейных поверхностей связано с проблемами обеспечения точности их сопряжения, а по образующим конических поверхностей без бокового взаимного базирования по вертикальным плоскостям роликов – с высокой чувствительностью схемы замыкания к осевым смещениям роликов. Смыкание цилиндрических поверхностей нижнего и верхнего роликов представляется наиболее целесообразным ввиду легкости их обработки, надежности обеспечения равномерного зазора по ширине профиля, минимального скольжения поверхностей нижнего и верхнего роликов относительно друг друга. На практике силовое замыкание калибра выполняют за счет механизмов разведения и сведения валов (в клетях консольного типа на свободных концах валов обычно располагают замыкающую серьгу, имеющую механизм регулировки).

При проектировании роликов выбор расположения буртов в текущем переходе зависит от режимов подгибки и ширины подгибаемой полки (рис. 6.38), откуда следует, что величина одностороннего «стеснения» полки D_k^2 составляет величину:

$$D_k^2 = 2 \cdot b \cdot \sin \left(a_k - \frac{Da_k}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{Da_k}{2} \right), \quad (6.8)$$

где b – ширина полки; α_k – суммарный угол подгибки на k -м переходе; $\Delta\alpha_k$ – угол подгибки полки в k -ом переходе.

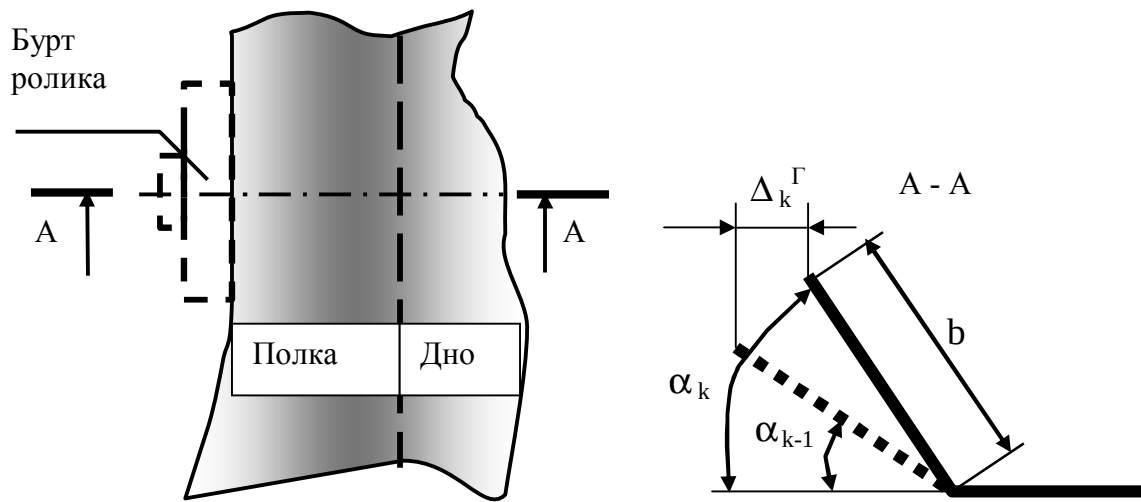


Рис. 6.38. Положение заготовки в калибре

На рис. 6.39 представлены наиболее целесообразные схемы замыкания калибров, а рекомендуемые значения конструктивных параметров приведены в табл. 6.4.

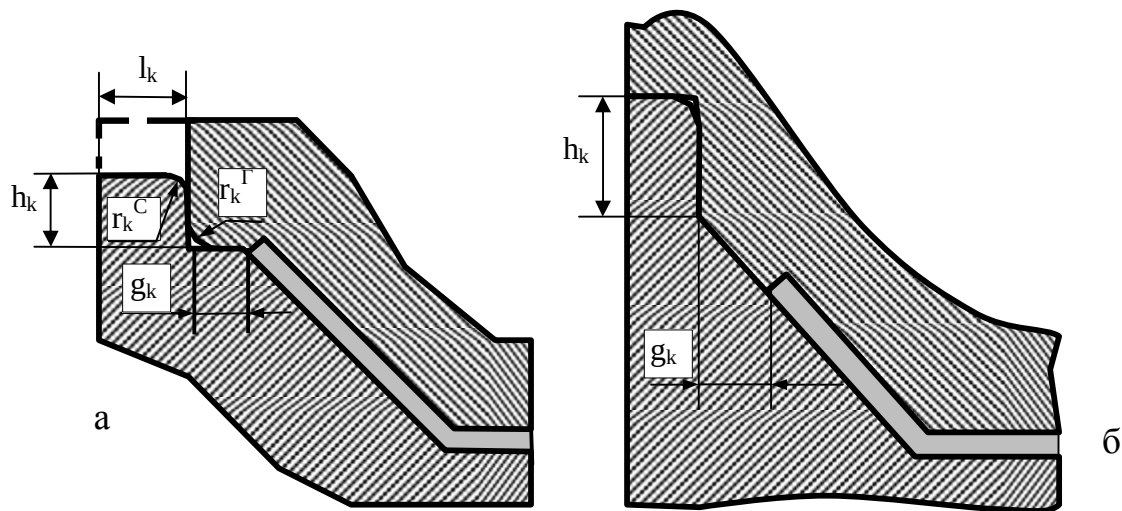


Рис. 6.39. Бурты роликов для выполнения функции бокового взаимного базирования и базирования смыкания: а – линии разреза – образующая цилиндра; б – линия разреза – образующая конуса

Замыкание калибров с полками, обращенными вниз, будет аналогичным рассмотренному, с учетом обращения роликковой пары. При изготовлении профилей с горизонтальным расположением периферийных элементов, на последних переходах следует предусматривать наклон периферийного участка на 4 – 6 градусов относительно горизонтали во избежание кромковой волнистости полки (см. также п. 6.13). При этом существенное значение имеет ширина подгибаемого элемента и угол подгибки несущего его элемента, оказывающие решающее значение на наличие или отсутствие кромковой волнистости.

Конструктивные параметры роликов

Наименование параметра и его обозначение	Соотношения между параметрами, их значения	Примечания
Радиус галтели, r_k^{HG}	$r_k^{HG} = 2...3$ мм	Требование отсутствия концентраторов
Радиус скругления бурта, r_k^{HC}	$r_k^{HG} \leq r_k^{BC}$; $r_k^{HC} = 1...2$ мм	
Высота рабочей торцевой части ролика, выполняющей боковое базирование, h_k^{HB}	$h_k^{HB} = 4...5$ мм	
Высота бурта, h_k^H	$h_k^H = h_k^{HB} + r_k^{HC} + r_k^{HG}$	
Расстояние от точки разъема калибра до бурта, g_k^H	$0 < g_k^H < D_k^H$	См. формулу (6.8)
Ширина бурта, DI_k	$DI_k = 10...15$ мм	
Нижний индекс «к» указывает номер перехода; верхний индекс «Н» относится к нижнему ролику, а «В» – к верхнему; «Г» указывает галтель, «С» – скругление; «Б» – боковое взаимное базирование роликов		

Таким образом, выполненный анализ позволил сформулировать следующие общие рекомендации по выбору замыкания калибров: 1) Врезание калибра следует по возможности осуществлять в верхний ролик; 2) Линия разъема калибра должна состоять из отрезков образующей конуса/цилиндра и вертикальной линии; 3) Боковое взаимное базирование роликов надлежит осуществлять буртом охватывающего нижнего ролика; 4) Базирование смыкания целесообразно выполнять по образующим цилиндрических поверхностей буртов; 5) Расположение буртов по отношению к точке начала разъема калибра (местоположение кромки заготовки) должно соответствовать условию центрирования и «стеснения» заготовки с учетом конфигурации калибра предшествующего перехода.

6. 17. Проектирование технологического оснащения

Процедуры проектирования технологического оснащения для реализации СИ с достаточной полнотой изложены в работах [368, 215, 410, 411, 216]. Основные вопросы проектирования формующего инструмента для осуществления МИД рассмотрены выше в данном разделе. Здесь же дадим общий обзор и некоторые сведения по разработке КД на технологическое оснащение процесса формообразования профилей [344].

Проектируемый инструмент должен отвечать не только требованиям функционального назначения и стойкости, но и ряду эргономических требований: удобство установки ролика на стан; удобство настройки горизонтальной оси профилирования; удобство установки зазора в паре роликов и т.п. При проектировании инструмента также следует руководствоваться соображениями экономической целесообразности, в частности, применение метода функцио-

нально-стоимостного анализа (ФСА) позволяет существенно сократить затраты на изготовление инструмента.

Технологическое оснащение процесса изготовления листовых профилей по группам основных операций включает: 1) оснастку для раскройно-заготовительных операций в составе ножей многодисковых, инструмента для обсева скосов; 2) оснастку для пробивки отверстий (перфорационные штампы летучего типа, перфорационные штампы на базе летучих прессов); 3) оснастку для формообразования профилей в составе роликов формующих, втулок распорных, роликов правильных, роликов или фильер промежуточных; 4) оснастку для резки профиля в размер (отрубные штампы летучего типа, отрубные штампы на базе летучих прессов).

Комплекты формующих роликов, представляющие основную технологическую оснастку при установке на станок образуют роликовые пары с рабочими калибрами, соответствующими формам технологических переходов. Посадочные места роликов должны соответствовать диаметрам рабочих валов и обеспечивать посадку типа H7/h7.

Острые кромки роликов скругляют радиусами $R = 0.3 \div 0.5$ мм; на посадочных отверстиях роликов выполняются фаски $5 \times 30^\circ$, необходимые для облегчения установки роликов на валы стана, а также для установки роликов в центра токарных станков для их доводки или восстановления. Чистота обработки роликов принимается $\nabla 0.8$, рабочего контура роликов $\nabla 0.4$.

Диаметры формующих роликов на всех переходах следует выбирать конструктивно, исходя из межцентрового расстояния, диаметров рабочих валов и глубины формовки (глубины "вреза"). Для достижения достаточной прочности роликов необходимо обеспечить в местах минимальной толщины в радиальном направлении запас материала не менее 10 мм. Для станка ГПС-350М6 при глубине формовки до 50 мм рекомендуется диаметры роликов выбирать в диапазоне от 90 до 200 мм.

Рационально унифицировать форму и размеры конструктивных элементов нерабочего контура в пределах одного комплекта роликов. Простановку размеров рабочего контура роликов следует производить от технологических баз комбинированным методом. В качестве баз при назначении размеров в осевом направлении рекомендуется использовать вертикальные прямолинейные участки, замыкающие рабочий контур.

На этапе проектирования роликов необходимо учитывать условия получения прямолинейного профиля и стабилизации процесса формообразования. Главным из этих условий является обеспечение (за счет рационального проектирования инструмента и настройки станка) прямолинейности оси профилирования и ее параллельности базовым поверхностям станка (рис. 6.40).

Рекомендуется для облегчения и упрощения настройки оси профилирования предусматривать на стадии проектирования выполнение следующих условий: 1) постоянство межцентровых расстояний по всем переходам, что облегчает настройку оси в вертикальной плоскости (при отступлении от данного условия потребуются дополнительные расчеты и увеличится трудоемкость процесса настройки); 2) постоянство расстояний от основной оси профиля до

торцевой установочной плоскости станка, как правило, нижних роликов на всех переходах, что облегчает настройку в горизонтальной плоскости.

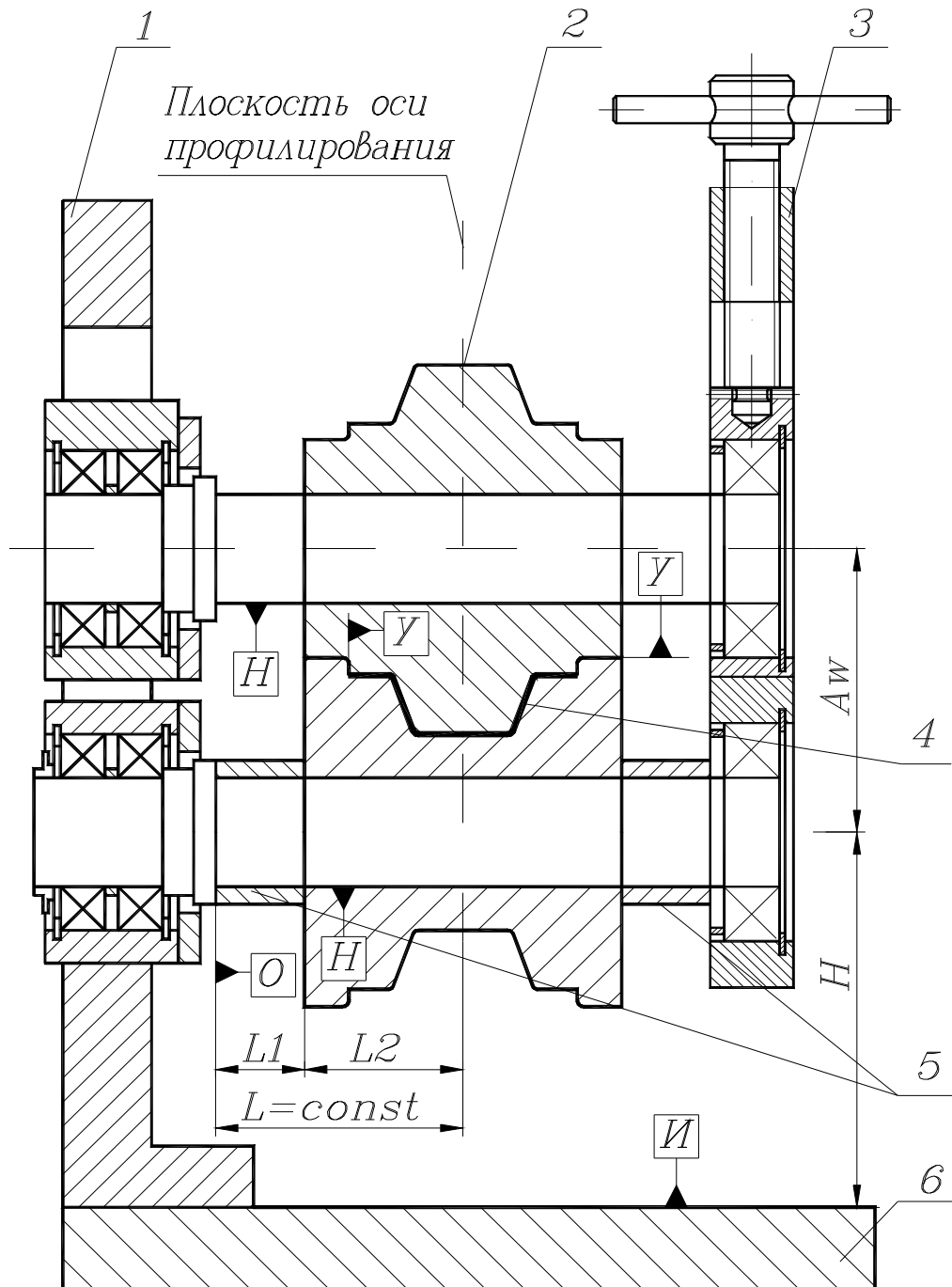


Рис. 6.40. Установка оси профилирования и базирование поверхностей: 1 – клеть профилегибочного стана, 2 – формующий инструмент, 3 – серьга замыкающая, 4 – заготовка, 5 – установочные втулки, 6 – станина; О – опорная база, Н – направляющая база, У – установочная база, И – измерительная база

С целью экономии материала целесообразно назначать разную ширину роликов. В таких случаях необходимо предусмотреть применение компенсирующих распорных втулок, обеспечивающих постоянство суммарной размерной цепи от основной оси профиля до установочной базы станка на всех переходах; для обеспечения точности размеров сечения профиля и стабилизации процесса следует в роликовом калибре выдерживать равномерность и посто-

яныство зазоров как в осевом, так и в радиальном направлениях. Для реализации данного условия на этапе проектирования инструмента целесообразно предусмотреть базирование роликов друг по другу, как правило, верхнего по нижнему; установочные втулки и формирующие ролики должны иметь соответствующую маркировку, причем маркировка должна быть доступна для проверки правильности установки инструмента на станок. Посадочные места роликов должны соответствовать диаметрам рабочих валов и обеспечивать посадку типа H7/g6.

Главной особенностью рабочих калибров для интенсивного формообразования является замкнутый по всему периметру рабочий контур (закрытый калибр). Замыкание рабочего контура, осуществляемое по торцам калибров, обеспечивается специальными конструктивными элементами двух типов: буртами, применяемыми при горизонтальном расположении краевых элементов профиля, и уступами – при их вертикальном расположении (рис. 6.41).

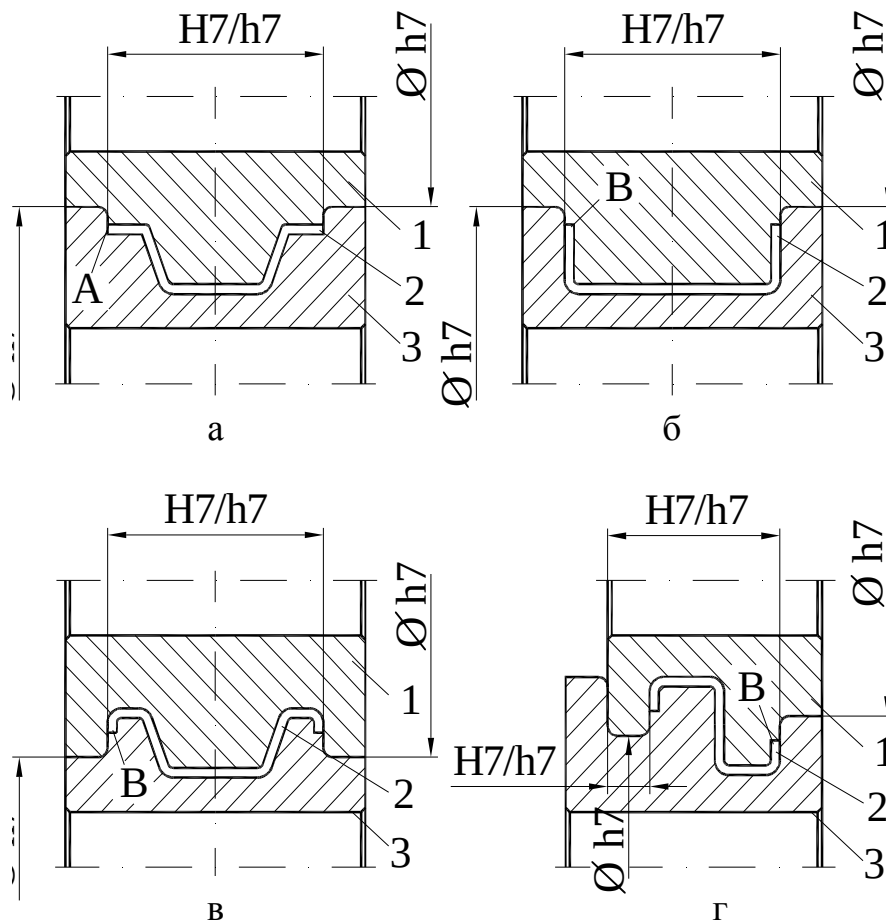


Рис. 6.41. Калибр для метода интенсивного деформирования:

1 – верхний ролик, 2 – заготовка, 3 – нижний ролик;

А – бурты, В – уступы

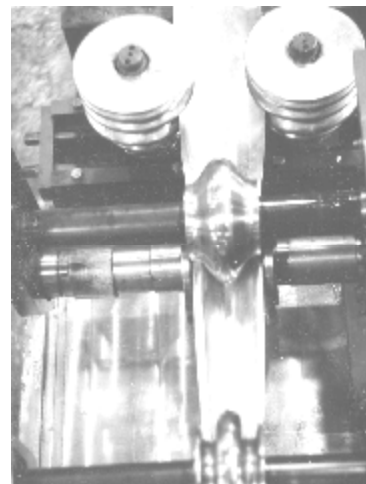
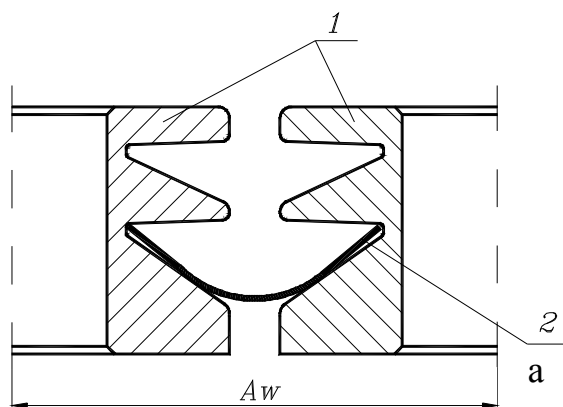
Бурты охватывающих роликов следует проектировать в виде выступов толщиной 15...25 мм со скруглением по радиусу порядка 3 мм. Величина прямолинейных, сопряженных с верхним роликом, участков буртов должны обеспечивать их перекрытие по высоте не менее 4...6 мм (см. также рекомендации п. 6.16).

Равномерность боковых (вертикальных) зазоров в калибре, исключение возможности относительного смещения роликов в осевом направлении обеспечиваются соединением верхнего и нижнего роликов торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадкой "в замок" по H7/h7 на окончательном и предварительных переходах. Нижний ролик при этом, как правило, является охватывающим базовым, верхний – охватываемым. В ряде случаев для переходов предварительного формообразования при небольших углах подгибки и надежной фиксации полосы в направляющем устройстве допустимо применение открытых калибров, не имеющих ограничений по торцам. Однако применение закрытых калибров предпочтительнее благодаря лучшему центрированию заготовки, равномерности зазора в калибре, интенсификации формообразования.

Для базирования роликов в радиальном направлении следует предусмотреть в конструкциях роликов базовые поверхности, фиксирующие заданную величину радиального зазора в калибре. В качестве баз рекомендуется использовать ступицы и бурты роликов. Требования по механообработке этих элементов такие же, как и для рабочего контура роликов.

При определении количества роликовых пар в комплекте оснастки (переходов гибки) и проектировании рабочего контура роликовых пар следует основываться на выбранной схеме формообразования профиля, при этом рекомендуется располагать профиль полками вверх.

На первом переходе гибки эффективно применение профилирующих роликов с вертикальными осями для создания направленной потери устойчивости при торцевом (поперечном) сжатии заготовки (рис. 6.42). Благодаря широкому диапазону регулировки межцентрового расстояния в первой клетке станка ГПС и отсутствию верхнего формующего инструмента ролики являются широкоуниверсальными и могут быть использованы при формообразовании одностипных профилей с различной шириной и толщиной заготовки. Возможно



б

Рис. 6.42. Ролики с вертикальными осями для придания заготовке направленной потери устойчивости: 1 – ролики, 2 – заготовка

также применение устройств направленной потери устойчивости, работающих по принципу скольжения (рис. 6.43), однако роликовые устройства предпочтительнее.

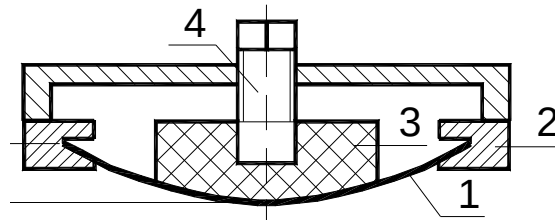


Рис. 6.43. Устройство направленной потери устойчивости заготовки:
1 – заготовка; 2 – ориентирующие планки; 3 – оправка; 4 – нажимной винт

Конструктивно ролики технологических переходов могут быть выполнены цельными или сборными (рис. 6.44).

Применять конструкции сборных роликов рекомендуется в случаях: 1) невозможности или сложности обработки рабочей поверхности инструмента; 2) необходимости изготовления гаммы однотипных профилей, например, профилей швеллерного типа с различной шириной донной части; 3) частой замены быстроизнашивающейся рабочей части ролика.

К основным достоинствам закрытого калибра можно отнести следующее: 1) обеспечение условий интенсификации процесса профилирования; 2) обеспечение устойчивости процесса формообразования гнутых тонкостенных профилей; 3) обеспечение точности поперечного сечения профиля; 4) удобство в процессе изготовления инструмента (возможность контролировать зазор в паре роликов); 5) удобство установки роликов на стан.

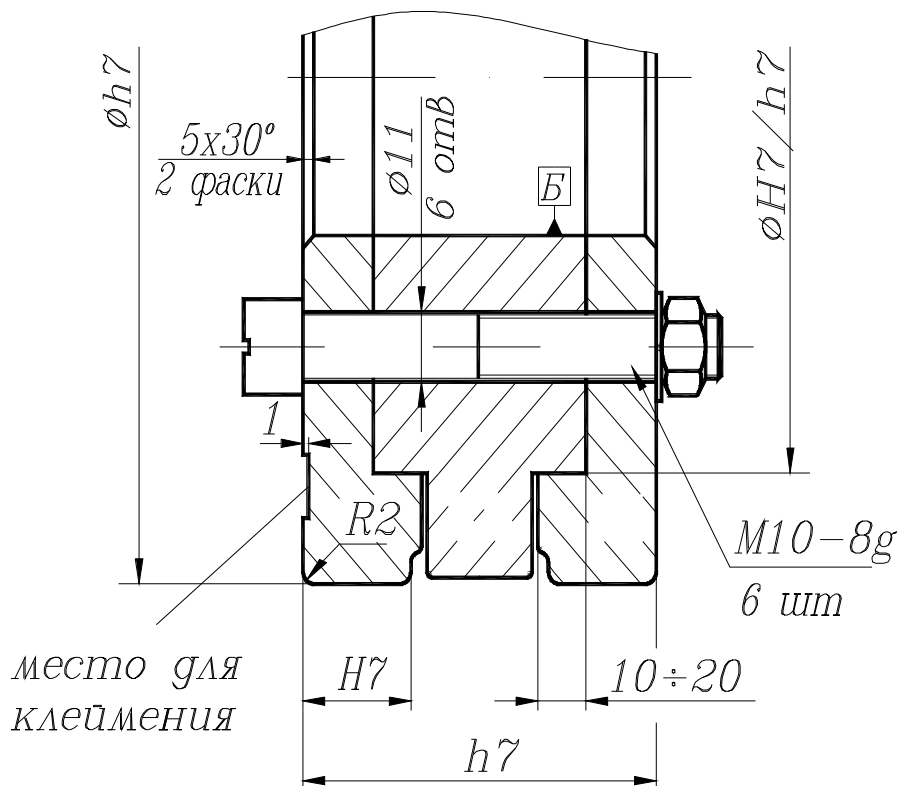


Рис. 6.44. Конструкция сборного ролика

Основным недостатком инструмента такой конструкции является сложность его изготовления.

На рис. 6.45 представлены комплекты формирующих роликов и их функционирование при изготовлении зетобразного и корытного профиля.

Кроме формирующих роликов при профилировании заготовки также могут использоваться различного вида фильеры.



Рис. 6.45. Комплекты формирующих роликов для реализации технологии интенсивного формообразования

Фильеры [216] предназначены преимущественно для правки профилей в процессе их формообразования. Фильера представляет собой пару выполненных из бронзы и продольно профилированных с одной рабочей стороны призм, образующих рабочими сторонами контур, соответствующий конфигурации профиля. Для надежного попадания профиля в калибр каждый паз рабочего контура фильер должен иметь заходный прямолинейный наклонный или криволинейный по дуге окружности участок. Места сопряжения прямолинейных заходного и рабочего участков фильеры должны быть плавно округлены, а концевые участки следует профилировать по форме сопрягаемых с фильерой роликов с целью облегчения захода профиля в фильеру (рис. 6.46). Габаритные размеры фильер унифицированы должны соответствовать параметрам правильно-

го устройства по присоединительным размерам. Установку фильер в гнездо правильного блока производить по посадке типа H11/d11.

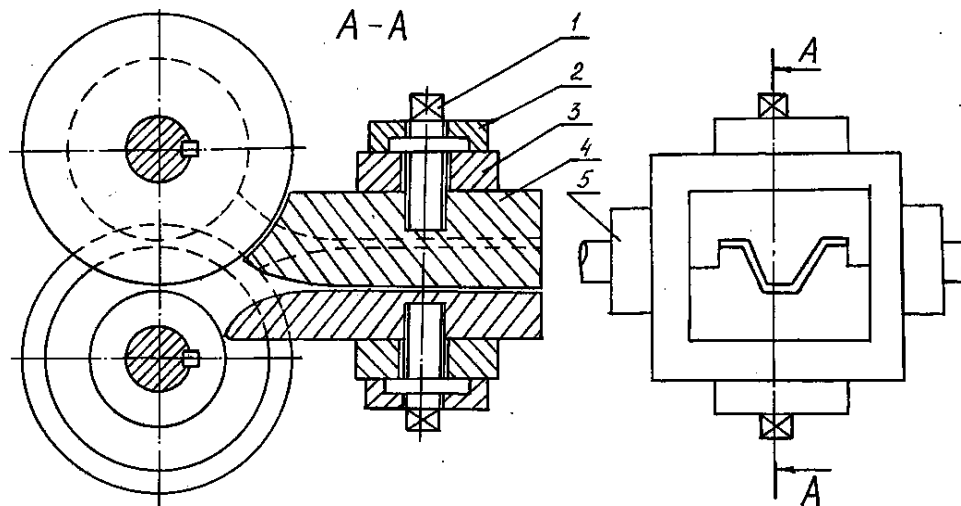


Рис. 6.46. Фильера правильная: 1 –винт; 2 – крышка; 3 – корпус; 4 – фильера; 5 – коромысло

Ролики подрезные, разрезные и дисковые ножи является традиционным инструментом, на который распространяются общие требования к отрезному инструменту.

Важным вопросом обеспечения качества технологического оснащения и, следовательно, качества изготавливаемого профиля является выбор материала. В табл. 6.5 приведены материалы (и их химический состав), рекомендуемые для изготовления формующего и вспомогательного инструмента. Приведем характеристику материалов по каждому виду профилегибочного инструмента с указанием его термической обработки:

- Сталь 20 – входные направляющие планки с цементацией и закалкой рабочих поверхностей до твердости HRC = 60...63, а также дистанционные втулки без термообработки.
- Сталь 20X – оси вспомогательных роликов с цементацией и закалкой до твердости HRC = 60...63.
- Сталь 40X – оси вспомогательных роликов, направляющие планки, оправки с закалкой до твердости HRC = 42...46.
- 9X, 9XBГ, XBГ – формовочные валки сложной конфигурации, применяются после термической обработки с твердостью HRC = 55...59.
- 9XC – формовочные валки сложной конфигурации, применяется после закалки с твердостью HRC = 58...62. Эта сталь является лучшим материалом для изготовления валкового инструмента сложной формы.
- Ст. 45 – формовочные валки простых конфигураций, небольших диаметров, применяются после термической обработки при HRC = 55...59.
- X12M, 9XC – матрицы и пуансоны для резки/рубки профиля, ножи дисковых ножниц для холодной резки рулонных заготовок.

6.18. Технологические маршруты изготовления профилей и деталей

6.18.1. Влияние маршрута на механические свойства профиля

Под технологическими маршрутами подразумевается последовательность операций изготовления профилей и деталей из них, правки, промежуточной и окончательной термообработки и др., а также их режимы. Важность определения технологических маршрутов для авиационной технологии обусловлена тем, что изготовленные профили в дальнейшем подвергаются последующим формообразующим операциям, требующим определенного запаса пластичности материала. Выполнение же межоперационных термообработок может снижать прочность авиационных сплавов до 10 %.

При принятии решения по назначению технологических маршрутов основывались на результатах приведенных в разд. 4 исследований свойств и поведения авиационных сплавов, из которых изготавливали гнутые профили. Для указанной номенклатуры профилей (рис. 4.22 и 4.23, а также рис. 7.1, см. разд. 7) кроме исследований, описанных в разд. 4, проведены механические испытания профилей из сплавов Д16чА, В95пчА и 01450, полученных по различным технологическим маршрутам. Использовали образцы, вырезанные из каждого элемента профиля согласно ГОСТ 11701-84 при скорости нагружения 10 мм/мин на машине ФР 100/1 по методике ГОСТ 1497-84.

Испытания уголковых образцов (нестандартных) проводили на установке ИМАШ (АДА-ТОО 20-75) с использованием захватов специальной конструкции. На основе пятикратных замеров проводилась статистическая обработка полученных данных. Доверительный интервал для σ_b и $\sigma_{0,2}$ составил ± 10 МПа, для δ – ± 1 % при вероятности 0,95.

Свойства элементов профилей из сплавов Д16чА и В95пчА, изготовленных по аналогичным маршрутам и получившим близкие степени деформации ($h_f = 1,06$, $r = 2,0$), изменяются в различной степени (табл. 6.6). Прочностные свойства практически всех элементов профиля из сплава В95пчА находятся на одном уровне, в то время как в уголковых зонах профилей из Д16чА имеется небольшое (около 6 %) снижение прочности вследствие его склонности к рекристаллизации (укрупнение зерна) (табл. 6.7).

Более тщательные исследования показали, что снижение прочности уголковых зон профилей на (4 – 6) % происходит, если укрупнение зерна наблюдается по всему сечению. В случае мелкозернистой структуры или наличии небольших приповерхностных участков с укрупненным зерном в зонах сгиба прочность возрастает до 15%, причем наибольший рост происходит в зонах сгиба со значительными утолщениями.

Также обнаружено появление крупнокристаллических ободков и зон крупного зерна в профилях, подвергшихся нагреву до температур, превышающих температуру рекристаллизации для данного сплава.

Испытания образцов профилей из сплава 01450 с различными утолщениями, не подвергавшихся перезакалке после деформации, показывают увеличение предела прочности до 8 % для профилей с утолщением зоны сгиба 9 % и на (2 – 15) % для профилей с утолщением 27 % по сравнению с листом, подвергнутым аналогичному режиму старения.

По зонам сгиба профилей с утолщениями порядка 9 % предел прочности возрастает по сравнению с листом на 6 – 10%. Режим старения существенно влияет на предел прочности материала у профилей с утолщением зоны сгиба в 27 %: при одноступенчатом старении наблюдается рост на 8 %, а при двухступенчатом – снижение на 4 %.

Перезакалка приводит к общему снижению прочностных характеристик и увеличению δ как профилей, так и исходного листа сплава 01450. Характерно, что на профилях с утолщением 9 % механические свойства всех элементов профиля сохраняются практически на одном уровне, а у профилей с утолщением 27 % перезакалка приводит к падению прочности на 7 – 10% по зонам сгиба, что объясняется появлением крупного зерна по всему сечению зоны сгиба профилей, прошедших перезакалку.

6.18.2. Разработка маршрутов и директивной технологии

Для обеспечения рациональной организации изготовления деталей из профилей, создания специализированных участков групповых технологических процессов и поточных линий, была принята технология изготовления деталей в два этапа [466]. На первом этапе осуществляли изготовление длинномерных профилей как исходных полуфабрикатов [465], а на втором – деталей из них.

Анализ возможных вариантов технологических маршрутов изготовления профилей позволил выделить два основных [215]: первый, связанный с формообразованием профиля в свежезакаленном состоянии, и второй, предусматривающий формообразование профиля в отожженном состоянии.

Состав операций технологических маршрутов и их последовательность при изготовлении профилей по вариантам приведены в табл. 6.8. Второй вариант предпочтительнее первого вследствие того, что он дает больший временной интервал для выполнения последующих операций (гибка, подсечка) в свежезакаленном состоянии. Это и определило выбор его в качестве базового варианта. Применение первого варианта ограничивалось лишь изготовлением деталей длиной более 6 м и в связи с небольшими размерами наличного термического оборудования. Отметим, что разработка технологических маршрутов изготовления деталей (табл. 6.9) базировалась на конструктивном классификаторе деталей стрингерного набора летательного аппарата, насчитывающем около 1500 деталей. Предложенные технологические маршруты были согласованы с ОКБ, ВИАМ (в отношении механических свойств и размеров зерна) и Главным НИАТ (по вопросам термической обработки заготовок и профилей).

Из профилей, полученных по первому или второму вариантам (табл. 6.8) изготовлены детали различной длины четырех типов: прямолинейные (с подсечками или без них) и криволинейные (с подсечками или без них) [410] для трех опытных машин на ММЗ им. С.В. Ильюшина. На основе табл. 6.8 и 6.9 была разработана, согласована с соответствующими организациями и передана заказчику директивная технология для подготовки серийного производства самолета ИЛ-114 [466]. Директивный технологический процесс, оборудование, технологическое оснащение внедрены на авиационных предприятиях г. Ташкента и Ферганы [466], а также других предприятиях-производителях самолё-

тов ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70 и АН-140 (более 10 предприятий). Стрингерные наборы планера каждого из указанных летательных аппаратов изготовлены (и изготавливаются в настоящее время) по разработанным технологиям, описанным в настоящей книге.

Таблица 6.8

Технологические маршруты изготовления профилей

Вариант 1: исходное состояние материала – отожжённое (М) или состаренное (Т, Т2)	
Профили без подсечек	Профили с подсечками
1. Раскрой листа и обезжиривание заготовки. 2. Закалка 3. Формообразование в свежезакаленном (с/з) состоянии 4. Правка растяжением в с/з состоянии 5. Обезжиривание (для сплава В95) и старение искусственное (В95) или естественное (1163) 6. Контроль геометрии, свойств и структуры	1. Раскрой листа и обезжиривание заготовки 2. Закалка 3. Формообразование в свежезакаленном (с/з) состоянии 6. Контроль геометрии, свойств и структуры
Вариант 2: исходное состояние материала – отожженное	
1. Раскрой листа 2. Формообразование 3. Обезжиривание и смазка 4. Правка растяжением в с/з состоянии 5. Старение искусственное (В95) или естественное (1163) 6. Контроль геометрии, свойств и структуры	1. Раскрой листа 2. Формообразование

Отметим в качестве замечания, что маршрут изготовления профиля часто определяется числом и видом последующих обработок профиля методами ОМД, которые требуют определенного времени. Естественное старение некоторых алюминиевых сплавов происходит за достаточно короткий временной интервал. При этом существенно ухудшаются деформационные характеристики материала, не позволяющие произвести дополнительные операции по изготовлению конечных деталей, предназначенных для сборки панелей летательного аппарата. В большинстве случаев такая ситуация складывается ввиду противоречия, возникающего между высокой производительностью заготовительного производства, где формуются профили, и сравнительно низкой производительностью производства конечных деталей, где кроме формующих операций присутствуют также операции термической обработки и отделочные операции.

Технологические маршруты изготовления деталей

Детали: прямолинейные.	
без подсечек (после правки растяжением в состаренном состоянии)	с подсечками (до правки растяжением в отожженном состоянии)*
1	2
1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка и зачистка. 3. Анодирование. 4. Окончательный контроль.	1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка. 3. Закалка. 4. Правка в свежезакаленном состоянии. 5. Подсечка в с/з состоянии. 6. Контроль, доводка, обезжиривание (B95). 7. Старение искусственное (B95) или естественное (1163) 8. Контроль механических свойств и структуры. 9. Отрезка, доводка. 10. Анодирование. 11. Окончательный контроль.
Детали: криволинейные	
1. Контроль внешнего вида и маркировки 2. Отрезка, гибка по контуру, доводка 3. Отрезка и зачистка торцев 4. Анодирование 5. Окончательный контроль	1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка. 3. Закалка. 4. Правка растяжением и гибка по контуру и доводка. 5. Подсечка и доводка в с/з состоянии. 6. Обезжиривание и старение. 7. Контроль механических свойств и структуры. 8. Отрезка припуска, доводка. 9. Анодирование. 10. Окончательный контроль.
* Допускается исходное состояние – свежезакаленное, при этом операция «3» исключается.	

Выводы

Выявленные методы и требования технологичности конструкции профиля и его изготовления позволяют принимать концептуальные решения: создание нового оборудования или интенсификация процесса формообразования.

Установленная последовательность этапов проектирования, оптимальные размеры заготовки, требования к скоростному режиму, расположению профиля по отношению к осям валов станка, выбору основной оси профиля, режимам подгибки элементов позволяют оптимизировать калибровку формирующих роликов с целью обеспечения надлежащего качества профиля и снижения производственных издержек.

Разработанные 11 способов производства профилей преимущественно типовой номенклатуры на основе интенсивного формообразования, защищенные охранными документами ФИПС.

Анализ способов формообразования, технологических схем и систем калибровки позволил определить для МИД в качестве основных параллельную систему калибровки и принцип формовки с постоянным радиусом зоны сгиба по переходам.

Расчетные углы подгибки следует проверять по двум дополнительным критериям: отсутствие потери устойчивости элементов профиля, соотношениям зоны плавного перехода и межклетьевого расстояния.

Разработанная на основе теоремы А.А. Ильюшина о разгрузке модель позволяет обеспечить размерную точность сечения профилей и увеличить срок эксплуатации технологического оснащения.

При производстве перфорированных профилей следует отдавать предпочтение процессу, предусматривающему предварительную пробивку отверстий и последующее профилирование, а в схеме замыкания калибров надлежит предусматривать конический участок, шириной не менее величины одностороннего сужения/стеснения профиля.

В схемах формообразования закрытых и полузакрытых профилей следует предусматривать для предчистового перехода расположение будущей горизонтальной подгибаемой полки с наклоном в $5 - 6^\circ$ к горизонтали.

Предотвращение нарушений покрытия заготовки может быть обеспечено схемой замыкания роликового калибра по образующей конического участка ролика, а также выполнением участков «высвобождения» или технологических уклонов.

Разработанный алгоритм проектирования технологии, включающий результаты теоретических и экспериментальных исследований работы, позволяет создавать эффективные технологии производства гнутых профилей методом интенсивного деформирования.

При разработке конструкции формирующих роликов врезание калибра следует по возможности осуществлять в верхний ролик; линия разъема калибра должна состоять из отрезков образующей конуса/цилиндра и вертикальной линии; боковое взаимное базирование роликов надлежит осуществлять буртом охватывающего нижнего ролика; базирование смыкания целесообразно выпол-

нять по образующим цилиндрических поверхностей буртов; расположение буртов по отношению к точке начала разъема калибра (местоположение кромки заготовки) должно соответствовать условию центрирования и «стеснения» заготовки с учетом конфигурации калибра предшествующего перехода.

Установленные требования к технологической оснастке, принципы универсализации формующих роликов и правильных фильер и рекомендации по выбору материала и проектированию оснастки позволяют обеспечить надлежащее качество профильной продукции при минимальных производственных издержках.

На основе комплексных экспериментальных исследований разработан директивный технологический процесс изготовления листовых профилей и деталей из них для отрасли авиастроения, внедренный на серийных заводах для производства самолетов ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70 и АН-140.

Таблица 6.5

Стали, применяемые для изготовления формующего инструмента

Марка стали	Химический состав, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	S	P
	не более									
20	0,15-0,25	0,35-0,65	0,17-0,37	—	—	—	—	—	0,045	0,045
20X	0,15-0,25	0,30-0,60	0,17-0,37	0,70-1,00	≤0,30	—	—	—	0,04	0,04
40X	0,35-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,80-1,10	≤0,30	—	—	—	0,04	0,04
9X	0,80-0,95	0,25-0,35	0,25-0,45	1,40-1,70	≤0,30	—	—	—	0,03	0,03
9XBГ	0,85-0,95	0,90-1,20	0,15-0,35	0,50-0,80	≤0,35	0,50-0,80	—	≤0,30	0,030	0,030
XBГ	0,90-1,05	0,80-1,10	0,10-0,40	0,90-1,20	≤0,35	1,20-1,60	—	≤0,30	0,030	0,030
9XC	0,85-0,95	0,30-0,60	1,20-1,60	0,95-1,25	≤0,35	≤0,20	≤0,15	≤0,20	0,030	0,030
Ст. 45	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	0,30	0,30	—	—	—	0,030	0,030
X12M	1,45-1,70	≤0,35	≤0,4	11,0-12,5	≤0,35	—	0,15-0,30	0,50-0,80	0,030	0,030

Примечание:

Механические характеристики указанных сталей можно найти в многочисленных справочных изданиях по машиностроительным сталям, например, в справочнике [130].

Таблица 6.6.

Механические свойства материала профилей

Номер профиля*	**Элемент профиля	Значения по элементам			Значения по профилю			Нормы по ОСТ 190125–83
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	ε , %	σ_B , МПа	σ_T , МПа	ε , %	
124	Н	440	308	17,6	421	305	16,9	$\sigma_B \geq 415$ МПа; $\sigma_T \geq 275$ МПа; $\delta \geq 13$ %; (1163АТ)
	В	428	309	16,6				
	С	396	297	16,4				
125	Н	441	323	16,0	443	325	18,6	
	В	445	321	20,0				
	С	442	331	19,7				
123	Н	483	392	10,7	480	392	11,0	$\sigma_B = 460\text{--}540$ МПа; $\sigma_T = 390\text{--}470$ МПа; $\delta \geq 8$ % (В95пчТ2)
	В	485	382	11,9				
	С	473	401	10,4				
127	Н	495	410	10,5	493	397	10,7	
	В	481	356	9,5				
	С	503	426	12,0				
128	Н	475	394	10,7	482	405	10,6	
	В	480	401	10,8				
	С	492	421	10,4				

* – см. разд. 7; ** Н – нижняя полка; В – верхняя полка; С – стенка.

Таблица 6.7

Структура материала профилей

Элементы профиля	Структура, зернистость (балл по ГОСТ 21037.1–75 / диаметр, мкм)				
	В95пчАТ2			1163АТ	
	123	127	128	124	125
Стенка, верхняя полка	Р/М, 4/18	Р/М, 3–4/88–125	Р/М, 6–7/31–44	Р/М, 3–4/88–125	Р/М, 5–6/44–62
Нижняя полка	М/У, 3–4/88–125	У/У, 2–3/125–177	Р/М, 5–6/44–62	Р/М, 3–4/88–125	Р/М, 3–4/88–125
Зоны сгиба	М/У, 3–4/88–125	У/У, 2–3/125–177	Р/М, 5–6/44–62	У/У, 2–3/125–177	К 1–2/ до 500
Торцы	М/У, 3–4/88–125	У/У, 2–4/88–177	Р/М, 5–6/44–62	У/У, 3/125	К 1–4/88–250

Обозначения: Р/М – равномерная мелкозернистая структура;
М/У – мелкозернистая с участками укрупненного зерна;
У/У – с участками укрупненного зерна;
К – с участками крупного зерна.

7. ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ

Результаты исследований, полученные в ходе работы, были использованы при разработке оборудования и технологии интенсивного формообразования гнутых профилей, которые внедрены более чем на двухстах предприятиях РФ и стран ближнего зарубежья. Ниже рассматриваются некоторые аспекты и особенности внедрения разработанных технологий и оборудования.

7.1. Внедрение технологии стесненного изгиба

Технология СИ внедрена в отрасли авиастроения для производства самолетов ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70 и АН-140. На примере ИЛ-114 рассмотрим некоторые технические вопросы внедрения.

7.1.1. Геометрия сечения и ТУ на изготавливаемые профили

Геометрия сечения профиля была определена ОКБ и ЦАГИ, а назначение параметров зон сгиба осуществлялось на основе исследований, проведенных ВЦ АН СССР по теме «Исцелитель» в рамках целевой темы Министерства авиационной промышленности № 934. Изучалось влияние внутреннего радиуса и утолщения на концентрацию напряжений K в угловой зоне (точнее, на внутреннем контуре зоны сгиба) при кручении стрингера [42]¹³. Коэффициент концентрации напряжений определяется формулой:

$$K = \frac{t_{\max}}{t_0}, \quad t_0 = G \cdot q \cdot S_0, \quad (7.1)$$

где τ_0 – номинальное напряжение; G – модуль сдвига; θ – угол закручивания, приходящийся на единичную длину; S_0 – толщина стенки профиля.

Величину $\tau_{\max}$ находят из решения уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} = -2$$

с нулевым значением функции напряжений Прандтля на контуре $\phi(x, y) = 0$.

На рис. 7.1 представлен график изменения K от параметров зоны сгиба, откуда видно, что значительные утолщения и малый радиус приводят к повышению коэффициента концентрации напряжений, что соответствует уменьшению эксплуатационного ресурса летательного ап-

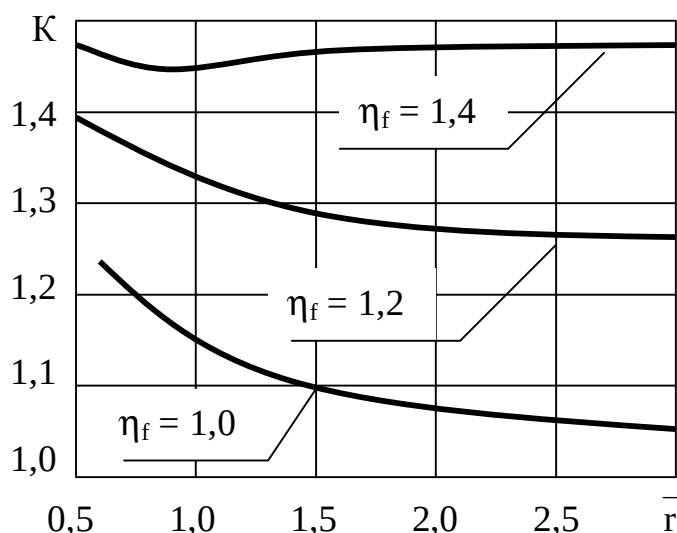
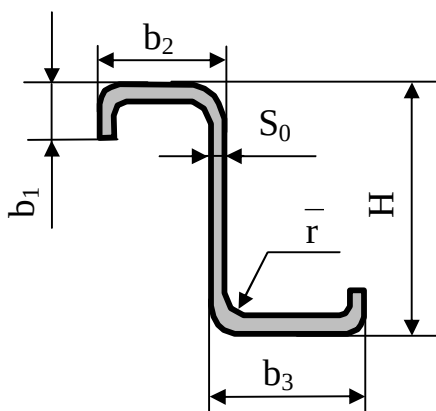


Рис. 7.1. Зависимость K от параметров зоны сгиба

¹³ Расчетные работы выполнены под руководством д.ф.-м.н. А.П. Прудникова и В.И. Власова



парата. Так как существуют ограничения по величине остаточных деформаций и условие отсутствия утонения, то во избежание больших (более 20 %) деформаций был выбран режим формообразования, при котором утолщение в зоне сгиба составляло 3 – 5 % (табл. 7.1). Отметим, что зависимости на рис. 7.1 хорошо согласуются с данными японских исследователей [467].

Рис. 7.2. Параметрическое представление размеров сечения зетобразного профиля

Таблица 7.1

Исходные данные
для разработки технологии

Номер профиля	Материал	S_0 , мм	H , мм	b_1 , мм	b_2 , мм	b_3 , мм	$\bar{r}$	$B_{\text{загот.}}$, мм
123	В95пчА	1,0	20	4	16	18	2	54,0
123	1163А	1,0	20	4	16	18	2	54,0
125	1163А	0,8	20	4	16	18	1,5	55,7
127	В95пчА	1,0	25	4	16	18	2	55,7
128	В95пчА	1,2	25	4	16	18	2,5	58,0
Утолщение в зонах сгиба – не более 10 %								

Таблица 7.2

Требования к изготавливаемым профилям

Контролируемый параметр	Требование	Примечание
1. Прогиб	Не более 1 мм/м	Под грузом 50 Н
2. Скрутка	Не более 1 град.	-----
3. Неровности поверхности в зоне сгиба	Не более 30 мкм	По высоте
4. Отклонения размеров сечения	Не более 0,2 мм	Кроме толщины
5. Допуск на толщину	В пределах исходного листа; уголовая зона без утонения	РТМ 1.4.1630–86
6. Остаточная деформация	Не более 20 процентов	-----
7. Механические свойства	По ОСТ 190125–83	

Технические требования ОКБ распространялись на гнутые пробилы из листовых материалов марок Б95пчАТ2 и 1163АТ толщиной 0,8; 1,0; 1,2 мм с сечениями, приведенными на рис. 7.2 и в табл. 7.1. В изделиях применяются профили в закаленном и состаренном состояниях в качестве стрингерных наборов фюзеляжа и оперения. Каждая партия профилей должна изготавливаться из одной партии листа или лент одного состояния. Контролю механических свойств (при растяжении) подвергают 100 % листов и 10 % профилей, изготовленных из испытанных листов. После набора статистических данных процент контролируемых профилей и листов уточнялся. Технические условия на профили были сформулированы ОКБ (табл. 7.2) и переданы разработчику технологии для разработки технологии изготовления профилей методом стесненного изгиба на опытные изделия.

7.1.2. Изготовление профилей

Заказчику был поставлен станок ГПС-200М для формообразования профилей. Для раскроя и подрезки в размер заготовки вместе со станками ГПС был также поставлен раскройный станок ДИН-300 (дисковые ножницы).

Для осуществления технологического процесса изготовления профилей была разработана и изготовлена технологическая оснастка под сечения, изображенные на рис. 7.2 (табл. 7.1), в соответствии с рекомендациями и требованиями, изложенными в разд. 6 данной книги. Формообразование осуществляли за четыре перехода (рис. 7.3). Для самолетов АН-70 и АН-140 по просьбе заказчика технология была реализована за шесть переходов (применительно к поставленному станку ГПС-500М6, используемому также для производства других видов профилей).

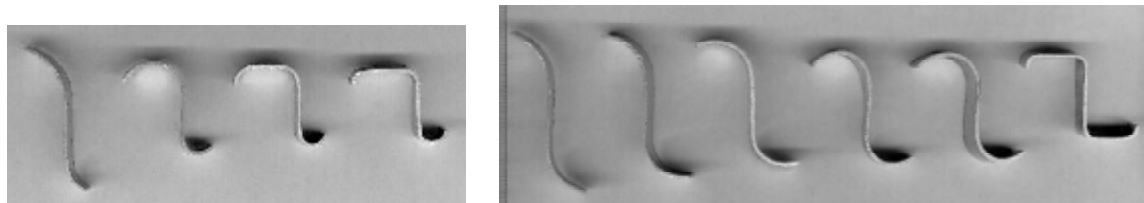


Рис. 7.3. Изготовление профилей для авиационных конструкций за четыре перехода (ИЛ-114, слева) и шесть переходов (АН-70, справа)

На рис. 7.4 представлены образцы заготовок, полученные разрезкой цельной заготовки по местам осевых плоскостей клеток станка (рис. 7.5).

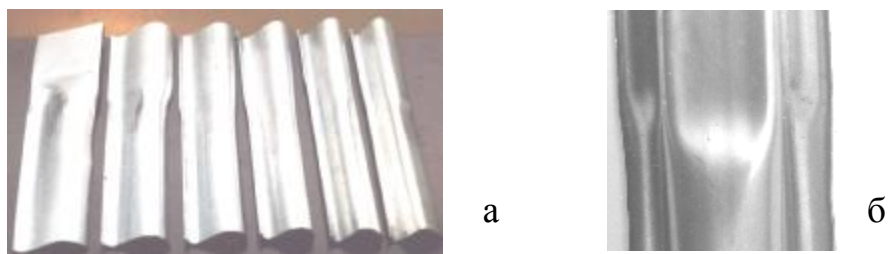


Рис. 7.4. Конфигурации заготовок в межклетьевом пространстве Z-образного (а) и корытного (б) профиля

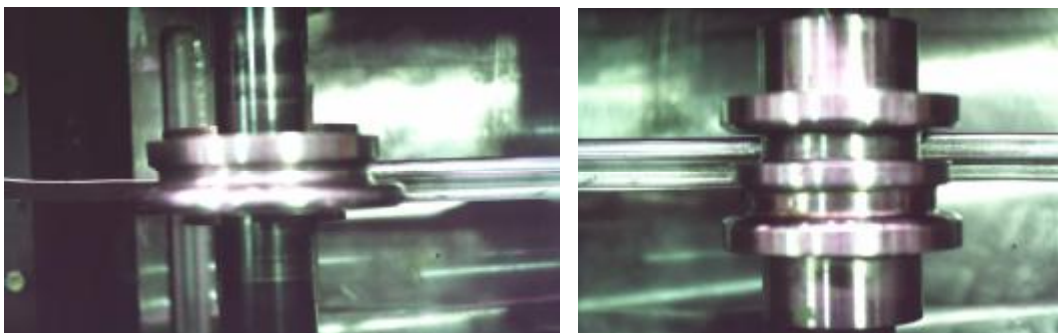


Рис. 7.5. Предварительное (слева) и окончательное (справа) формообразование Z-образного профиля

7.1.3. Изготовление деталей

Согласно п. 6.18 стрингеры должны иметь поперечную кривизну нижней (присоединяемой) полки с подсечками под места стыковки листов и продольную кривизну по контуру фюзеляжа и оперения. Для самолета ИЛ-114 поперечную и продольную кривизну придавали профилю одновременно в гибочно-прокатной четырехроликовой машине с оправками (дополнительная технологическая операция). Для самолетов АН-70 и АН-140 эти операции для некоторых деталей были совмещены с формообразованием сечения).

Определенную сложность представляло собой выполнение односторонних подсечек одной из полок [468]. В отличие от традиционной подсечки, выполняемой сдвигом всего сечения профиля, здесь по сути дела выполняется лишь подштамповка полки профиля. В работе [468] из рассмотрения нескольких схем выполнения односторонней подсечки в закрытых штампах выявлено, что наиболее благоприятной является схема формообразования сдвигом с осадкой (рис. 7.6).

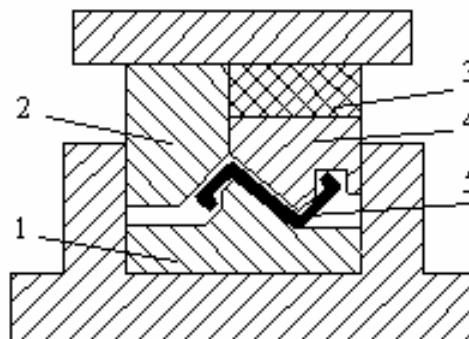


Рис. 7.6. Подсечка профиля: 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – буфер; 4 – прижим; 5 – профиль

Для неё определены максимальные деформации переформовки зоны сгиба и участков сбega, а также определено пружинение полки Δh после подсечки:

$$\Delta h = \Delta h_0 + \Delta h_c + \Delta h_n, \quad (7.2)$$

где Δh_0 – величина пружинения вертикальной стенки; Δh_c – величина пружинения участка сбega; Δh_n – пружинение горизонтальной полки в пересчете на периферийный участок.

При проектировании оснастки на матрице и на пуансоне были выполнены уклоны для компенсации пружинения ($\Delta h = 0,2\text{--}0,6$ мм), исходя из формулы (7.2) и номограммы работы [468].

Усилие подсечки P складывается из силы P_{yt} , потребной для осадки уголовой части и ее переформовки; силы калибровки P_k , необходимой для вы-

прямления ранее согнутого участка полки вблизи уголковой зоны; силы P_c , потребной для переформовки зоны сгиба; силы прижима заготовки P_n :

$$P = P_{yz} + P_k + P_c + P_n. \quad (7.3)$$

Формулы для определения слагаемых в правой части уравнения (7.3) даны в работах [469, 470], а зависимость (7.3) была использована при выборе оборудования и расчете параметров буфера прижима.

Результаты исследований работ [469 – 470] включены в отраслевые ТР [410, 167] в виде номограмм и расчетных зависимостей.

7.1.4. Характеристики профилей

По указанным выше режимам были изготовлены партии профилей, которые были переданы ВИАМ и ЦАГИ для последующих испытаний. Оценку **точности** размеров поперечного сечения изготавливаемых профилей производили измерением (объем выборки – 5–7 штук от партии одного наименования) с помощью штангенциркуля (точность измерения $\pm 0,02$ мм), радиусомера и оптического микроскопа (измерение утолщений). Результаты измерений после их статистической обработки приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Геометрия сечений профилей

Номер профиля	H, мм max min	b ₁ , мм	b ₂ , мм	b ₃ , мм	$\bar{r}$	$(\eta_f - 1) \cdot 100\%$
123	$\frac{20,2}{19,8}$	4,1	16,1	18,0	2,0	3,5
124	$\frac{20,1}{19,8}$	4,0	16,1	18,0	2,0	4,3
125	$\frac{20,1}{19,8}$	3,8	16,0	18,0	1,8	5,0
127	$\frac{25,2}{24,8}$	4,0	16,0	18,1	1,9	3,0
128	$\frac{25,2}{25,0}$	4,2	16,0	18,1	2,6	5,0

Как видно из табл. 7.3, профили удовлетворяли требованиям ОКБ по размерам поперечного сечения (см. табл. 7.1) и другим характеристикам (см. табл. 7.2).

Механические свойства определялись на образцах, вырезанных из полок и стенок профилей. Испытания проводили на разрывной машине «Инстрон» с записью диаграммы нагружения при скорости перемещения захватов 10 мм/мин и шкале нагрузок до 5000 Н. Результаты испытаний в виде усредненных характеристик (по пять образцов на точку) приведены в табл. 6.6. Сопоставление действительных зна-

чений прочностных характеристик профилей с требованиями ОСТ указывает на их удовлетворительное соответствие. Испытания образцов длиной 88–100 мм на местную потерю устойчивости проводили на испытательной машине FP 100/1 с записью диаграммы при скорости нагружения 0,05 мм/с. Результаты испытаний приведены в табл. 4.4 и свидетельствуют о довольно высоком уровне механических свойств профилей.

Таблица 7.4

Испытания профилей на местную потерю устойчивости

Номер профиля	Высота образца, мм	Площадь сечения, мм	$\sigma_{кр}$, МПа	$\sigma_{кр}/\sigma_T$
123	100	54,0	354	0,90
124	100	54,0	214	0,70
125	80	44,6	176	0,55
127	100	59,7	297	0,75
128	100	69,6	345	0,85

Исследования поверхностного слоя на изготовленных профилях показали, что нарушений (типа задигов, царапин, микротрещин, отслоений, зажимов и т. п.) не обнаружено. Наблюдаются небольшие утолщения по зонам сгиба до 5 %, полкам – до 2 %, торцам – до 5 %..

Структуру профилей исследовали на шлифах методами оптической металлографии. Результаты исследований приведены в табл. 6.7. Неравномерность зерна (особенно для сплава 1163) имеет место вблизи контуров зоны сгиба и на торцах отбортовок. Для профилей с подсечками характерно смещение зоны укрупненного зерна на прямолинейный участок полки, что связано с перестройкой зоны сгиба.

Проведенные в ВИАМ **коррозионные испытания** образцов профилей на расслаивающую и межкристаллитную коррозию показали, что межкристаллитная коррозия отсутствует, а степень расслаивающей коррозии профилей с удаленной травлением плакировкой не превышает 4 баллов для всех режимов изготовления профилей, что примерно соответствует характеристикам исходного листа.

Определение **сопротивления малоциклового усталости** профилей в ВИАМ и ЦАГИ на образцах длиной 300 мм осуществлялось на основе осевого циклического растяжения ($\sigma_{max} = 160$ МПа, $\sigma_{min} = 0$, $\nu = 6$ Гц) на машине MTS. Разрушение образцов происходило при $N = (140 - 240)10^3$ циклов.

7.1.5. Разработка отраслевой нормативно – технической документации

Достигнутые научные и практические результаты в части изготовления профилей и деталей из них закреплены в нормативно–технической документации: РТМ [216], ТР [368, 369, 410, 167], ММ [411], а также в директивном технологическом процессе. В указанных документах отражены все вопросы проектирования и изготовления оснастки, настройки оборудования, контроля качества профилей и техники безопасности при производстве профилей. Требования

ния разработанных нормативно-технических документов являются обязательными в авиастроении при использовании метода стесненного изгиба.

7.1.6. Общий объем внедрения технологии СИ в отрасли

Технология СИ и специализированное оборудование в различной комплектации с 1986 по 2004 г. внедрено на предприятиях отрасли авиастроения в г. Москва, Луховицы, Саратов, Смоленск, Таганрог, Иркутск, Тбилиси, Ташкент, Фергана и др., всего на 13 предприятиях отрасли.

Технология СИ для производства типовых профилей (рис. 7.7) внедрена также и на ряде предприятий других отраслей промышленности. Цикл работ по внедрению технологии СИ отмечен в 1989 году премией МАП.

7.2. Внедрение метода интенсивного деформирования

Метод интенсивного деформирования внедрен более, чем на 200 предприятиях России и стран ближнего зарубежья, которые могут быть отнесены к 8 различным отраслям. На примере ЗАО «ИНСИ» (г. Челябинск) рассмотрим некоторые вопросы внедрения технологии и оборудования.

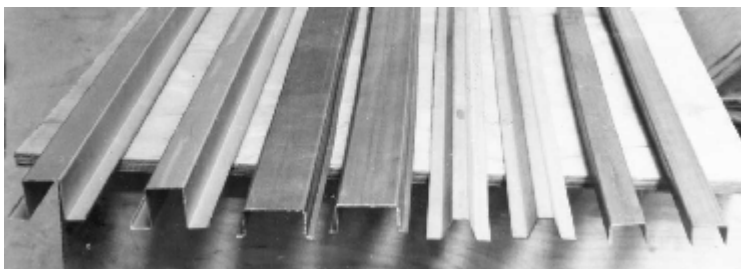


Рис. 7.7. Профили, изготовленные СИ

7.2.1. Исходные материалы и требования к профилям

Гнутые профили из проката тонколистового холоднокатаного и горячеоцинкованного с полимерными (органическими) покрытиями или без покрытия изготавливают длиной от 1 до 12 м. Предельные отклонения по длине не должны превышать ± 2 мм на 1 м длины. Предельные отклонения по толщине профилей должны соответствовать предельным отклонениям по толщине заготовки нормальной точности прокатки по ГОСТ 19904 без учета толщины покрытия. Предельные отклонения не распространяются на отклонения по толщине профиля в местах изгиба. Размерные и другие параметры должны соответствовать чертежу готового профиля.

Общие требования, предъявляемые к качеству гнутых профилей [344]:

1) поперечное сечение профиля должно соответствовать чертежу профиля и предъявляемым к нему требованиям; 2) серповидность профилей не должна превышать 1 мм/м, общая серповидность не должна превышать произведения допускаемой серповидности на 1 метр на длину профиля в метрах; 3) продольный прогиб профилей не должен превышать 1 мм/м, общий продольный прогиб не должен превышать произведения допускаемого прогиба на 1 м на длину профиля в метрах; 4) скручивание профиля вокруг продольной оси не должно превышать произведения 1° на длину профиля в метрах, но не более 10° ; 5) волнистость кромки не должна превышать 1 мм; 6) на поверхности профиля не допускаются вмятины, забоины, задиры, царапины, отслоение покрытия; 7)

трещины на торцах и по длине профиля не допускаются; 8) профили должны быть обрезаны под прямым углом. Отклонения от перпендикулярности реза к оси профиля не должно выводить профиль за номинальные размеры по длине.

7.2.2. Методы контроля

Марка и свойства исходного материала должны быть удостоверены документом о качестве предприятия-изготовителя. Качество поверхностей профилей определяется визуально, без применения увеличительных приборов. Контроль линейных размеров профилей осуществляют измерительным инструментом, указанным в п.2 (см. также работу [344]). Качество резки проверяют внешним осмотром.

7.2.3. Изготовление инструмента

Изготовление основных формующих валков к профилировочному станку производят в следующей последовательности:

1) Резка сортового проката или поковок на заготовки (механическая ножовка, пила Геллера); 2) Токарная обработка отрезанных заготовок в габаритный размер ролика, сверление отверстия под вал (универсальный токарный станок типа 16К20); 3) Черновая токарная обработка по рабочему контуру с припуском 0.5 мм на линейные размеры и 1 мм на диаметральные, труднодоступные места обрабатываются без припусков в чистовой размер (универсальный токарный станок типа 16К20); 4) Сверлильные, долбежные и другие слесарные операции; 5) Термическая обработка (58..62 HRC); 6) Шлифовка посадочного отверстия под вал и торцев ролика (внутришлифовальный станок); 7) Чистовая обработка наружного контура (рис. 7.8) в центрах на токарных станках (универсальный токарный станок типа 16К20, индикаторная стойка, эльборовый режущий инструмент); 8) Полировка рабочего контура (полировочный станок, наждачная бумага различной зернистости, паста ГОИ, войлок).

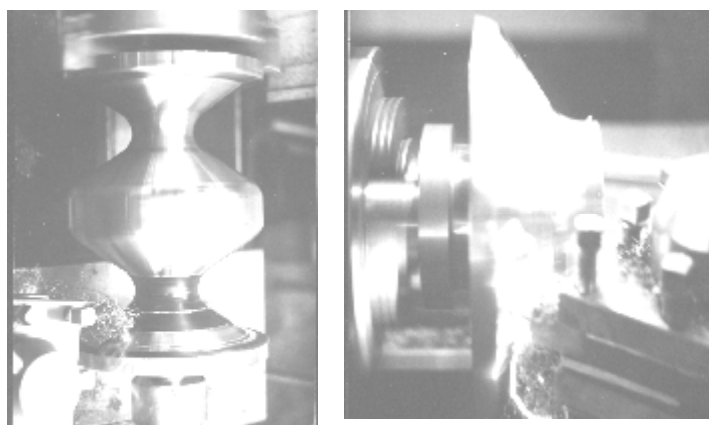


Рис. 7.8. Изготовление роликов в условиях экспериментального производства

При изготовлении инструмента размеры рабочего контура роликов всех переходов контролируют согласно чертежу. При работе периодически контролируется состояние рабочей поверхности роликов и посадочных мест на предмет отсутствия трещин, рисок, царапин и следов налипания материала заготовки.

При проектировании и изготовлении технологического оснащения для разделительных операций (раскроя, перфорации, отрезки) руководствуются рекомендациями, выработанными в отрасли машиностроения [471-473].

7.2.4. Освоение технологии

Освоение технологии изготовления гнутых тонкостенных профилей методом интенсивного деформирования производили в соответствии с технологической картой табл. 7.5.

Таблица 7.5

Технологическая карта отработки опытного профиля

№ операции	Наименование операции	Образец	Наименование инструмента
1.	Установить на валы формообразующие ролики и выставить их по оси профилирования. Свободные концы валов замкнуть серьгой.	Опытный профиль	Комплект формообразующих роликов. Профилировочный станок.
2.	Выставить направляющее устройство в горизонтальном и вертикальном направлениях по оси профилирования и установить его планки на ширину заготовки.		Профилировочный станок.
3.	Вставить ролики в обойму правильного устройства.		Комплект правильных роликов.
4.	Подать заготовку через направляющее устройство в ролики клетки предварительного формообразования.	$\Delta B = \pm 0,2$ мм	Профилировочный станок.
6.	Произвести формообразование в роликах профилирующих клеток.		Комплект формообразующих роликов. Профилировочный станок.
7.	Произвести контрольные замеры.		Плита поверочная, универсальная индикаторная стойка, угломер, штангенциркуль.

7.2.5. Характеристики профилей

Оценку **точности** размеров изготавливаемых профилей производили прямым измерением (объем выборки – 5% от каждой партии одного наименования) с применением штангенциркуля (точность измерения 0.05 мм), угломера, радиусомера, набора щупов и лекальной линейки (L = 1 м). Результаты измерений приведены в табл. 7.6.

Геометрия сечения профилей типовой номенклатуры «ИНСИ»

Ширина дна С, мм	Высота полки Н, мм	Высота отбор- товки g, мм	Толщина S, мм	Отклонения от номинальных размеров		
				ΔС, мм	Δ Н, мм	Δ g, мм
Профили швеллерного типа						
110±2	45±1	—	0.7	−0.4	−0.1	—
			1.0	−0.3	−0.1	
145±2	45±1	—	0.7	−0.4	−0.1	—
			1.0	−0.3	−0.1	
			1.2	−0.1	−0.2	
			1.5	+0.1	−0.2	
170±2	45±1	—	0.7	−0.4	−0.1	—
			1.0	−0.3	−0.1	
			1.2	−0.1	−0.2	
			1.5	+0.1	−0.2	
195±2	45±1	—	0.7	−0.5	−0.1	—
			1.0	−0.4	−0.1	
			1.2	−0.3	−0.2	
			1.5	0	−0.2	
200±2	45±1	—	0.7	−0.5	−0.1	—
			1.0	−0.4	−0.1	
			1.2	−0.3	−0.2	
			1.5	0	−0.2	
220±2	45±1	—	0.7	−0.5	−0.1	—
			1.0	−0.4	−0.1	
			1.2	−0.3	−0.2	
			1.5	0	−0.2	
Профили С типа						
145±2	45±1	13−1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4
150±2	45±1	13−1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4
195±2	45±1	13−1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4
200±2	45±1	13−1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4

Как следует из таблицы 7.6, профили удовлетворяли требованиям Заказчика по размерам поперечного сечения. В поперечном сечении профиля отклонения от угла 90° не превышали $\pm 30'$. Выпуклость и вогнутость стенок профилей не превышала 0,01 линейного размера соответствующего элемента профиля. Местная кривизна профилей не превышала 0,5 мм на 1 м длины профиля, при этом скручивание профилей вокруг продольной оси отсутствовало.

Исследования **поверхностного слоя** на изготовленных профилях показали, что нарушений (типа задиров, царапин, трещин, отслоений, зажимов, заусенцев и т.п.) не обнаружено. В отдельных случаях (при изготовлении С-образных профилей) наблюдается небольшое утолщение по торцам – до 7%.

Проведенные в ОАО «НИИЛКП» с ОМЗ "Виктория" **коррозионные испытания** образцов профилей по определению влияния деформации на свойства антикоррозионных покрытий, нанесенных на оцинкованный лист показали, что деформация в процессе формообразования профиля не привела к нарушению целостности ни цинкового, ни защитного покрытия.

Испытания проводились в камере соляного тумана. При изучении образцов в процессе испытаний особое внимание обращалось на состояние торцевых участков и зон сгиба. Как видно из табл. 7.7, после 260 часов испытаний все покрытия остались без изменений, а на оцинкованных образцах выхода продуктов коррозии основного металла на поверхность не наблюдалось.

Таблица 7.7

Результаты испытаний образцов в камере соляного тумана

Наименование материала	Цвет покрытия	48 час	96 час	120 час	260 час
Полиэстер	Красный	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	Вишневый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	Коричневый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
Пластизоль	Светло-зеленый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	Темно-зеленый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
Сталь оцинкованная	Без покрытия	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм

7.2.6. Внедрение технологии на площадях заказчика

Регламент внедрения технологии предусматривает следующую последовательность:

- 1) Сдача КД на технологическое оснащение в производство.
- 2) Проведение авторского надзора за изготовлением инструмента.
- 3) Приемочные испытания и апробирование технологического оснащения.
- 4) Отработка технологии.
- 5) Получение опытной партии профилей.
- 6) Метрологический анализ профилей и их исследования.
- 7) Внесение изменений и примечаний в КД на технологическое оснащение.
- 8) Передача технологического оснащения и документации заказчику.
- 9) Запуск технологии каждого из профилей в серийное производство.

- 10) Получение заключения ОТК и ЦЗЛ на каждый профиль.
- 11) Оформление акта о внедрении оборудования и технологии.

Объем внедрения оборудования – две автоматизированные линии по изготовлению гнутых профилей.

Состав линии 1 (рис. 7.9):

- станок гибочно-прокатный;
- устройство перфорирующее пневматическое;
- устройство отрезное пневматическое;
- отсчитывающее устройство;
- электронный блок управления;
- руководство по эксплуатации автоматизированной линии.

Состав линии 2:

- станок гибочно-прокатный;
- устройство для перфорации профиля на базе прессы КД 2128;
- устройство для отрезки профиля на базе прессы КД2126;
- отсчитывающее устройство;
- электронный блок управления;
- руководство по эксплуатации автоматизированной линии.

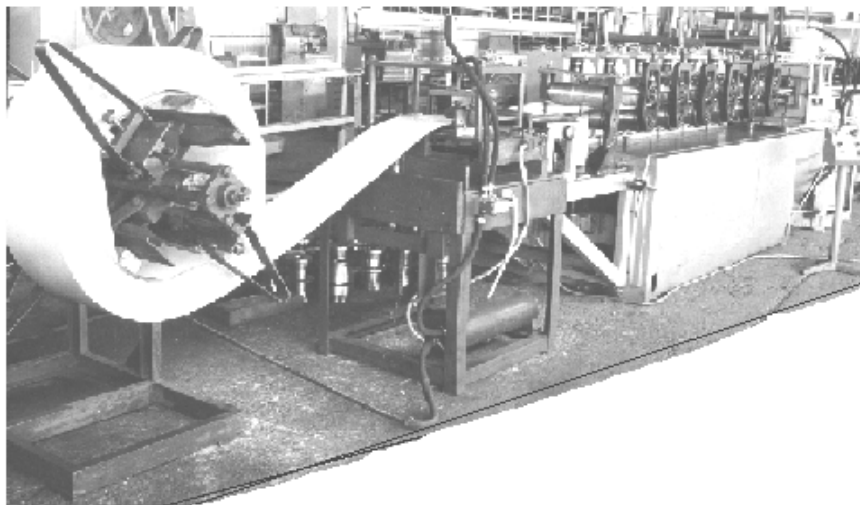


Рис. 7.9. Автоматизированная линия для ОАО «ИНСИ»

Объем внедрения технологии составил 49 типоразмеров гнутых перфорированных профилей с покрытием, в том числе:

- швеллерный профиль – 27 типоразмеров;
- С-образный профиль – 16 типоразмеров;
- корытный профиль – 1 типоразмер;
- специальный профиль – 5 типоразмеров.

7.2.7. Общий объем внедрения технологии МИД

На рис. 7.10 представлены профили для различных отраслей промышленности, преимущественно строительной индустрии.

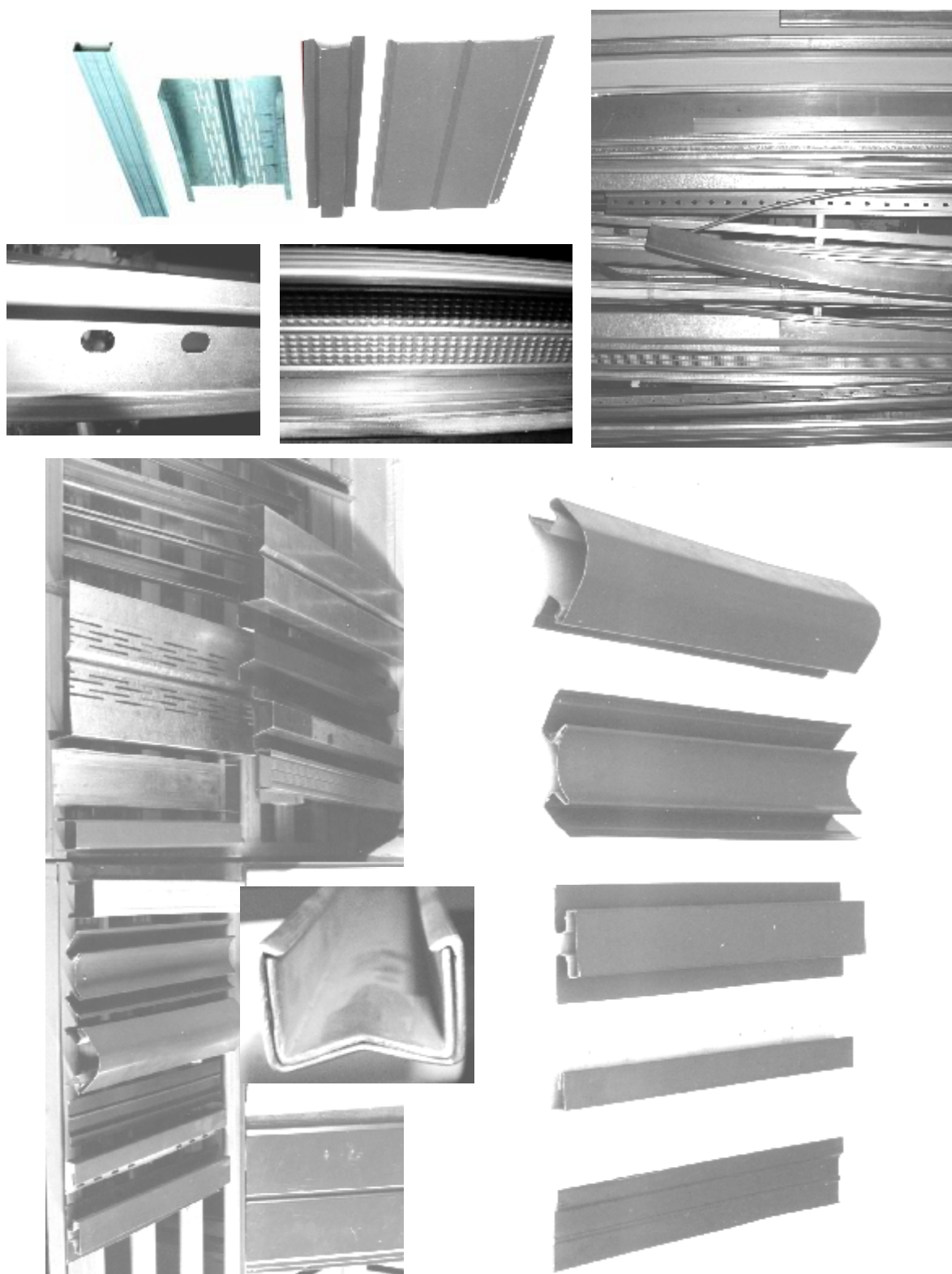


Рис. 7.10. Образцы профилей, изготовленные МИД

За последние 4 года предприятиями-разработчиками г. Ульяновска освоено более 700 типоразмеров профилей на основе технологии МИД. Технология производства этих профилей внедрена в **8** отраслях промышленности более, чем на **200** предприятиях РФ, а также в Узбекистане, Казахстане, Грузии, Белоруссии и на Украине [474, 344].

7.3. Особенности внедрения оборудования

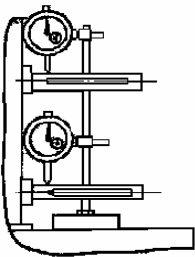
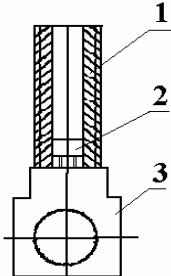
Вопросы разработки и внедрения оборудования подробно описаны в разд. 5. Здесь же отметим эволюцию оборудования, связанную с реальными условиями эксплуатации. Первый станок ГПС-200 был относительно громоздким, валы крепились в подшипниках скольжения, которые при износе приводили к значительным биениям валов и делали станок непригодным для дальнейшей эксплуатации. В очередной модификации ГПС-200М эти недостатки были устранены (см. разд. 5). В каждой последующей модификации устранялись недостатки предшествующей. Изменения, вносимые в каждую из модификаций, были направлены на снижение металлоемкости, уменьшение габаритов, расширение технологических возможностей и удобство в эксплуатации.

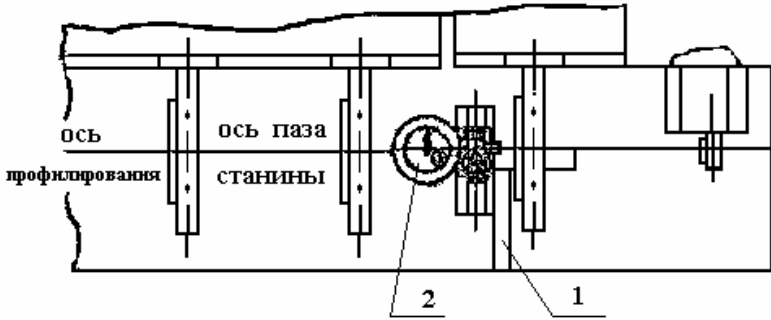
После изготовления под авторским надзором разработчика оборудование подвергается приемочным испытаниям, качество осуществления которых напрямую влияет на качество производимой на данном оборудовании профильной продукции. Проведение приемочных испытаний требует внимательности и определенного опыта работы на данном оборудовании.

Рассмотрим типичную процедуру проверки и испытаний станка ГПС-350М6 (табл. 7.8).

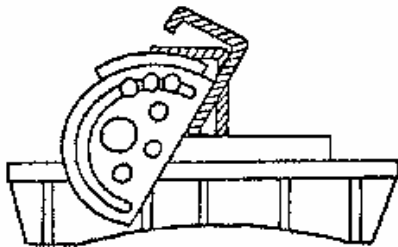
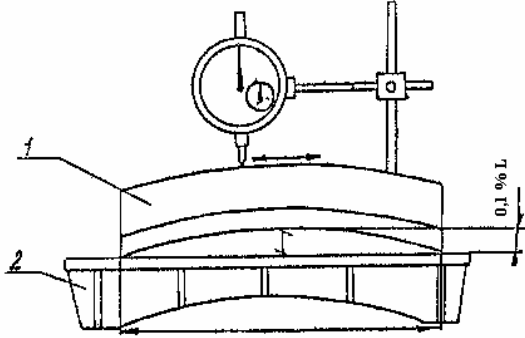
Таблица 7.8

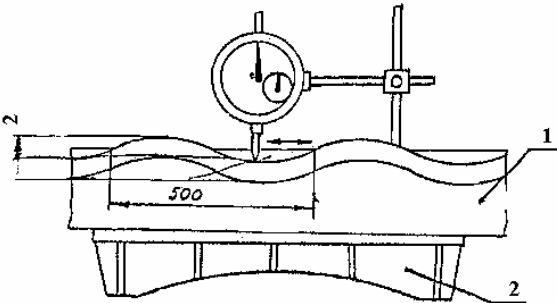
Таблица проверок

№№ проверок, что проверяется	Метод контроля	Результат проверки	Примечание
1	2	3	4
1. Комплектность 2. Маркировка	Внешний осмотр Внешний осмотр	Соответствует Соответствует	
 Рис. 7.11  Рис. 7.12			
3. Испытание по нормам точности и жесткости 3.1. Допуск параллельности осей рабочих валов клетки профилирующей	Рис.7.11, натяг нако- нечника индикатора - 1 мм.	0.2 мм на длине 200 мм	При отклонении - освободить винт 1 (рис.7.12), опу- стить ползун 3 и повернуть на пол оборота ходовой винт 2.

1	2	3	4
 Рис. 7.13			
3.2. Допуск перпендикулярности осей рабочих валов к оси профилирования. Примечание: Ось профилирования параллельна оси паза на станине.	Рис. 7.13. К натянутой параллельно оси профиля струне (± 0.05) прикладывают угольник 1 (УЛП), вдоль длинного основания которого перемещают стойку 2. Натяг кончика индикатора - 1 мм при касании боковой образующей вала.	0.5 мм на длине 200 мм для клетки.	При выходе валов за допуск, ослабить болты крепления клетки к станине и выровнять клеть.
5. Требования к конструкции	Внешний осмотр	Соответствует	
6. Требования к ответственным деталям и сборочным единицам	Внешний осмотр	Соответствует	
7. Скорость рабочих перемещений исполнительных органов	Перемещать исполнительные органы из крайнего положения с хронометрированием. Перемещения определить штангенрейсмасом.	Соответствует	
Испытания на холостом ходу			
Испытания в рабочем режиме			
8. Действие аварийного выключателя	Многократным нажатием на аварийный выключатель «Стоп» убедиться в надежности его срабатывания.	Визуально убедиться, что электродвигатель станка отключается автоматически.	
9. Требования к надежности	Непрерывная работа в течение двух смен.	8 часов	

Продолжение табл. 7.8

1	2	3	4
10. Проверка отклонений профиля 10.1. По высоте 10.2. По ширине 10.3. Предельные отклонения по толщине профиля должны соответствовать предельным отклонениям толщины поставляемого листа	Проверить штангенциркулем. Предельные отклонения по толщине профилей не распространяются на места изгиба.	Соответствует чертежу Соответствует ГОСТ 21631-76	Проводить формообразование согласно «Технологической карте». При проверке профиля концевые эффекты ≈ 300 мм с каждого конца не учитывать.
 Рис. 7.14			
10.4. Скручивание профилей вокруг оси	Один конец профиля (рис. 7.14.) уложить на плиту, на втором проверить скрутку при помощи угломера	1 град/м, общее скручивание не более 10° по всей длине детали	При отклонениях повернуть зубчатый сектор правильного устройства в сторону противоположную скрутки.
 Рис. 7.15			
10.5. Кривизна профиля в двух плоскостях	Профиль 1 (рис. 7.15) уложить на плиту 2 и измерить кривизну с помощью индикаторной стойки с натягом 2 мм	Не более 0.1 % измеряемой длины	При отклонениях построить правильное устройство.

1	2	3	4
			
Рис. 7.16			
10.6. Волнистость профиля	Профиль 1 (рис. 7.16) положить на плиту 2 и измерить волнистость полки с помощью универсальной индикаторной стойки. Индикатор настроить с натягом 3 мм.	2 мм/м	
Минимальная длина волны		500 мм	

По результатам приемочных испытаний и опытной эксплуатации обычно принимаются технические решения по совершенствованию оборудования. Например, в процессе опытной эксплуатации станка ГПС–200М были выявлены и устранены следующие недостатки. Одновременно с отработкой технологии был изготовлен переносной пульт управления станком, обеспечена подачей и сбором смазки клеть предварительного формообразования, увеличен объем масляного бака, доработаны углы регулировки клетей предварительного и окончательного формообразования, а также правильного блока; приведены в соответствие межосевые расстояния роликов и накидных серег за счет доработки последних. Кроме того, внесены предложения по модернизации станка для серийного производства, в частности, предложено спроектировать направляющее устройство с регулируемым углом наклона, устройство для удаления профиля из правильного блока, устройство для снятия заусенцев в процессе профилирования, а также систему жидкой смазки шестерных клетей и увеличения производительности станка до 20 м/мин. Все предложения были впоследствии реализованы при разработке профилировочных станков для серийного производства.

В процессе приемочных испытаний и отладки оборудования для ОАО «ИНСИ» (г. Челябинск) были выявлены его недостатки и проведены мероприятия по их устранению (табл. 7.9). Постоянное совершенствование оборудования и эксплуатационный мониторинг позволяют разработчику завоевывать хорошую репутацию у заказчиков и чувствовать себя устойчиво на рынке технологий.

Выявленные недостатки оборудования и их устранение

Вид недостатка	Мероприятие по устранению
1) Конструктивно не обеспечивается перпендикулярность планок направляющего устройства рабочим валам клеток стана.	1) Разработано устройство для точной установки направляющего устройства. 2) Проведено штифтование направляющего устройства.
3) Устройство протирки и смазки ленты не оправдывает своего функционального назначения.	Разработана и введена в эксплуатацию конструкция нового трехвалкового устройства протирки и смазки ленты.
4) Клеть предварительного формообразования с вертикальными осями не применима для изготовления профилей сложной конфигурации.	Разработана и введена в эксплуатацию конструкция клетки предварительного формообразования с горизонтальными осями, подходящая для изготовления профилей любой степени сложности.
5) Отсутствие устройства для формообразования профиля в межклетьевом пространстве.	Разработана и введена в эксплуатацию конструкция проводящего устройства с вертикальными осями, имеющими свободу перемещения в направлении перпендикулярном и параллельном движению профиля, с возможностью установки на них вспомогательных роликов, направляющих планок, оправок заполнителей и т.п.
6) В процессе работы клеть профилегибочного стана имеет возможность смещаться и разворачиваться.	1) Разработано устройство для точной установки клеток профилегибочного стана. 2) Проведено штифтование клеток.

Предложения по совершенствованию оборудования на основе табл. 7.9 включены в ТЗ на разработку номенклатурно-ориентированного гибочно-прокатного оборудования.

На ряде предприятий в текущем серийном производстве конечных изделий (например, в автомобилестроении [458]) для повышения мобильности производства, его надежности и экономии ресурсов целесообразен переход к технологии интенсивного деформирования с заменой или диверсификацией парка профилегибочного оборудования. При этом мобильность производства при переходе к новой продукции достигается за счет сокращения сроков разработки и освоения технологии; надежность достигается за счет взаимозаменяемости однотипного оборудования, экономия достигается за счет уменьшения энергозатрат, экономии материалов на оснастку, сокращения потребных производственных и складских помещений. Предварительные оценки показывают, что текущие расходы на содержание цеха/участка профилирования при одном и том

же выходе продукции (выпуск автомобилей – 100 тыс. в год, изготовление профилей 15 типоразмеров) для метода интенсивного деформирования в сравнении с традиционным профилированием уменьшаются на величину 3 – 12 % в зависимости от условий переоснащения [458].

Потребный парк профилегибочного оборудования можно определить из нижеследующих данных. Для обеспечения программы выпуска профильной продукции по i -й детали, имеющей длину l_i при количестве потребных деталей N_i за данный период времени должно иметь место соотношение:

$$v_i \cdot t_i \cdot k_1 \cdot k_2 \geq N_i \cdot l_i, \quad (7.2)$$

где V_i - производительность оборудования, м/ч; t_i - рабочее время, ч; k_1 - коэффициент использования оборудования, учитывающий потери времени на его обслуживание, смену рулона, дополнительную настройку ($k_1 \gg 0,9$); k_2 - коэффициент учета затрат времени на перенастройку станка при переходе на изготовление другого типоразмера профиля ($k_2 \gg 0,02$) при смене оснащения не более пяти раз в месяц.

Если по условиям работы предприятия известно число смен n_c , задействованных в сутки, а также число рабочих часов t_i^0 во временном периоде условного технологического цикла, то можно найти первоначально потребное число смен n_i для выполнения производственной программы по данной детали:

$$n_i = \frac{t_i}{t_i^0}. \quad (7.3)$$

С учетом соотношения (7.3) можно найти потребное число станков для производства i -й детали по формуле:

$$K_i = \frac{n_i}{n_c}. \quad (7.4)$$

Общее число станков K для данного производства найдем по формуле:

$$K = \text{Integer} \left(1 + \sum_{i=1}^m K_i \right), \quad (7.5)$$

где m – общее количество типоразмеров деталей, подлежащих изготовлению. Зависимости (7.2) – (7.5) позволяют определить состав парка профилегибочного оборудования, даже если оно будет разнородным. Последнее определяется путем анализа номенклатуры профилей к изготовлению на технологичность.

Объем внедрения оборудования, разработанного и изготовленного в г. Ульяновске, только за последние четыре года составляет более **100** автоматизированных и автоматических линий профилирования и раскроя рулонов. Только в г. Москве и Московской области работают более **30** таких линий.

7.4. Экономическая эффективность

Экономические расчеты чистого дисконтированного дохода, приведенные в работе [344], показывают, что окупаемость инвестиций в технологию и профилегибочное оборудование (автоматизированную линию) при двухсменной работе достигается к середине второго года его эксплуатации (срок оку-

паемости капитальных затрат составляет 1,26 года). Альтернативный подсчет функционирования реальной линии показал, что за 19 месяцев работы прибыль составила около 1700 тыс. руб. По сведениям некоторых заказчиков, специализация линии на эксклюзивном профиле, пользующимся спросом на рынке металлопродукции, приносит до 10 тыс. долларов в месяц. По заниженной оценке в расчете на работу внедренных линий профилирования годовой экономический эффект от разработок составляет не менее 50 млн. рублей.

При размещении заказа на технологическую оснастку и обосновании затрат производителю продукции следует иметь представление о монтажной партии. Под монтажной партией гнутых профилей понимают минимальный объем выпуска профильной продукции, который экономически целесообразно производить на данном технологическом оснащении. Расчет минимальной монтажной партии для профиля средних габаритных размеров и сложности показывает [344], что нижняя граница ее величины составляет не менее 30000 погонных метров профиля. Впрочем, величина монтажной партии зависит в большой степени от маржи между себестоимостью изготовления и рыночной ценой профиля. При средних условиях, как показывает практика, минимальная монтажная партия соответствует (15 – 30) – процентной выработке ресурса комплекта формирующих роликов.

7.5. Использование результатов работы в учебном процессе

Результаты исследований интенсивного формообразования применяются в Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ) по следующим направлениям образовательной деятельности [344]:

1) Выполнение курсовых и дипломных проектов по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением», «Листовая штамповка», «Средства автоматизации производственных процессов» по данной проблематике;

2) Создание наглядных материалов и пособий в рамках студенческой науки (оформлены панно с описанием и представлением образцов профилей; разработаны и изготовлены действующие модели одноклетьевого прокатно-профилировочного станка и мини-пресса для испытания профилей);

3) Подготовка конкурсных работ для дней студенческой науки (ежегодно в течение последних десяти лет студенты, работающие по направлению «Профилирование в роликах», получают дипломы 1–2 степени; в течение последних пяти лет представляется по одной студенческой работе от данного направления на конкурс Министерства образования РФ). В 2005 – 2006 гг. студенты университета по данному направлению были награждены дипломами, а в 2007 г. – грамотой Министерства образования РФ;

4) Подготовка аспирантов по данному направлению ведется с 2002 г.: в настоящее время обучаются 5 аспирантов; кандидатские диссертации защищены в 2003 и 2006 году; в 2007 году подготовлены к защите 4 кандидатских и одна докторская диссертация.

5) На кафедре имеется экспериментальный двухклетьевого профилигибочный станок для демонстрационных и лабораторных работ по листовой штамповке и теории обработки металлов давлением;

6) Студенты кафедры проходят учебные и преддипломные практики на предприятиях (в технологических бюро и на производственной базе), специализирующихся на разработке технологии и оборудования для производства профильной продукции;

7) Выпускники кафедры распределяются и успешно работают в области профилирования (среди них – мастера, начальники цехов, ведущие и главные технологи, директора по производству и генеральные директора).

7.6. Дальнейшее развитие технологий профилирования

Некоторые из перспектив развития указаны в работе [38]. В качестве наиболее настоятельных проблем отметим следующие:

- Разработка моделей процессов формообразования многоэлементных несимметричных профилей с покрытием, несущих элементы жесткости;
- Создание новых способов и схем формообразования профилей с заданной продольной кривизной или винтовой скруткой, способов перфорации, совмещенной с формообразованием;
- Разработка новых видов основного и вспомогательного оборудования;
- Автоматизация процессов проектирования и изготовления сложных профильных деталей;
- Подготовка справочников по проектированию и изготовлению профилей, каталогов профильной продукции, учебников для обучения производственного персонала и учебных пособий для студентов и аспирантов.

Выводы

Высокое качество профильной продукции, изготавливаемой по технологии стесненного изгиба, решение вопросов по маршрутам изготовления, выполнению подсечек, разработке отраслевой нормативно-технической документации позволило внедрить эту технологию в отрасль авиастроения для производства самолетов **ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70 и АН-140.**

На основе исследований и разработок метода интенсивного деформирования освоены технологии производства около **2000** типоразмеров профилей, которые внедрены в **8** отраслях промышленности более, чем на **200** предприятиях Российской Федерации и стран ближнего зарубежья.

Объем внедрения оборудования включает несколько сот единиц, в том числе более **100** автоматизированных линий профилирования и раскроя рулонов.

Срок окупаемости капитальных затрат на оборудование составляет в среднем **1,26** года. Годовой экономический эффект от разработок в расчете на работу внедренных линий профилирования составляет более **50 млн. рублей.**

Результаты исследований используются в учебном процессе в УлГТУ при обучении студентов и аспирантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представленные в работе результаты исследований и внедрения их в производство можно резюмировать в следующем виде:

1. Для мелкосерийного производства профильной продукции быстро меняющейся типовой номенклатуры с повышенными характеристиками жесткости и коррозионной стойкости наиболее целесообразным является применение интенсивных методов формообразования профилей в роликах (стесненного изгиба и метода интенсивного деформирования) и специализированного оборудования, позволяющих обеспечить высокую технико-экономическую эффективность производства.

2. На основе классификации элементов жесткости профилей, дефектов профилей, механических схем приложения сил и условий замыкания калибров выявлены основные факторы и направления интенсификации процессов формообразования профильных деталей в роликах и направления исследований; показано, что резервы интенсификации обеспечиваются комплексом мер, сочетающих использование конструктивных особенностей профилей, схем и режимов формообразования, конструкции инструмента и оборудования.

3. Разработанные модели угловой зоны, зоны плавного перехода, оптимизации углов подгибки, прогибов донной части профиля, обеспечения параметров точности, числа переходов и правки профилей позволяют обеспечить надлежащее качество продукции при минимальных капитальных и производственных затратах. Модель угловой зоны позволяет выявить ограничения на внутреннем контуре зоны сгиба в отличие от моделей традиционного профилирования, рассматривающих лишь разрушение наружного контура. Модель зоны плавного перехода в отличие от известных моделей учитывает анизотропию, подсадку заготовки и действие аксиальных сил. Модель оптимизации углов подгибки и критерий кромковой волнистости в виде индикаторной функции позволяют максимально интенсифицировать процесс формообразования без потери устойчивости элементов профиля. Модель прогибов донной части (эффект обнаружен впервые) устанавливает различие схем формообразования для узких и широких профилей. Модель обеспечения параметров точности позволяет учесть пружинение прямолинейных и криволинейных элементов профиля и увеличить срок службы инструмента за счет особой процедуры проектирования формирующих роликов. Гибридная модель числа переходов (аналоги отсутствуют) учитывает особенности конструкции профиля и оборудования, степень бокового стеснения, принцип формовки и дает возможность априорного определения необходимого числа клетей, а также может использоваться в качестве критерия подобия. Модель правки рассматривает состояние материала в выходном калибре в качестве пластического шарнира и представляет процесс правки в виде системы с обратной связью. Предложенные модели отличаются новизной, модели зоны плавного перехода и числа переходов служат в качестве отличительных признаков в патентах на изобретения.

4. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить соответствие разработанных моделей реальным процессам формообразования

профилей, установить оптимальные схемы для стесненного изгиба, выявить особенности деформирования перфорированных заготовок и заготовок с покрытием методом интенсивного деформирования.

5. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили определить основные проектные процедуры разработки технологии, создать эффективный алгоритм разработки технологии для метода интенсивного деформирования, провести необходимые расчеты технологического оборудования, а также создать новые способы производства профилей типовой номенклатуры и устройства для их осуществления (около 30 изобретений).

6. Разработанные модели, результаты экспериментальных исследований, установленные проектные процедуры, наличие профилегибочного оборудования фирменной разработки и результаты исследований в области выполнения подсечек обеспечили создание отраслевой нормативно-технической документации (4 ТР, ММ и РТМ) для производства профильных деталей, применяемых в качестве стрингеров летательных аппаратов.

7. Высокое качество профильной продукции, изготавливаемой по технологии стесненного изгиба, решение вопросов по маршрутам изготовления, выполнению подсечек, разработке отраслевой нормативно-технической документации позволило внедрить эту технологию в отрасль авиастроения для опытного и серийного производства самолетов **ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70 и АН-140**. На основе исследований и разработок метода интенсивного деформирования освоены технологии производства около **2000** типоразмеров профилей, которые внедрены в **8** отраслях промышленности более, чем на **200** предприятиях Российской Федерации и стран ближнего зарубежья. Объем внедрения оборудования включает несколько сот единиц, в том числе более **100** автоматических и автоматизированных линий профилирования и раскроя рулонов. Срок окупаемости капитальных затрат на оборудование составляет в среднем **1,26** года. Годовой экономический эффект от разработок в расчете на работу внедренных линий профилирования составляет не менее **50 млн. рублей**.

Результаты исследований и проектные процедуры используются в практике проектирования технологии и в учебном процессе в Ульяновском государственном техническом университете при обучении студентов старших курсов и аспирантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство гнутых профилей (оборудование и технология) / Под общ. ред. И. С. Тришевского и др. — М.: Металлургия, 1982. — 384 с.
2. Колганов, И.М. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей и особенности их формообразования / И.М. Колганов, В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // *Авиационная промышленность*. — 2001. — № 3. — С. 21 – 25.
3. Куприн П. Н. Разработка методов и алгоритмов проектирования процессов формообразования гнутых тонкостенных профилей методом стесненного изгиба с устранением потери устойчивости краевых элементов: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.05. — Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2004. — 223 с.
4. Гайнутдинов Р. Г. Усталостная прочность и коррозионная стойкость фюзеляжных стрингеров из прессованных и катанных полуфабрикатов / Р. Г. Гайнутдинов // *Авиационная промышленность*. — 1985. — № 5. — С. 19 – 20.
5. Свиницкий А. М. Исследование коррозионной активности фюзеляжного конденсата пассажирских самолетов / А. М. Свиницкий, Н. Ф. Воронкин, А. В. Карлашов, Р. Г. Гайнутдинов // *Физико – химическая механика материалов*. — 1982. — № 5. — С. 70 – 72.
6. Карлашов А. В. Исследование коррозионной стойкости элементов внутреннего силового набора / А. В. Карлашов, А. М. Свиницкий, П. В. Токарев // *Авиационная промышленность*. — 1986. — № 11. — С. 69 – 71.
7. Марковцев В. А. Разработка и внедрение технологии и оборудования для изготовления прямолинейных листовых профилей для авиационных конструкций методом стесненного изгиба: Дисс. канд. техн. наук: 05.07.04. — М.: НИАТ, 1991. — 202 с.
8. Колганов И. М. Повышение несущей способности панельных конструкций ЛА с профилями, гнутыми из листа / И. М. Колганов, С. В. Филимонов, Н. А. Щавлева // *Авиационная промышленность*. — 1999. — № 3. — С. 9 – 12.
9. Гиммельфарб, А. Л. Основы конструирования в самолетостроении / А. Л. Гиммельфарб. — М.: Машиностроение, 1980. — 367 с.
10. Белянин, П. Н. Производство широкофюзеляжных самолетов / П. Н. Белянин. — М.: Машиностроение, 1979. — 360 с.
11. Колганов И. М. О возможности использования в конструкциях изделий алюминиево – литиевых сплавов / И. М. Колганов, Б. В. Богданов // *Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология*. — 1992. — Вып. 1(22). — С. 9 – 12.

12. Колганов И. М. Изготовление панелей с гнутыми профилями из перспективных алюминиевых сплавов / И. М. Колганов, А. С. Башилов, Б. В. Богданов // *Авиационная промышленность*. – 1994. – № 9 – 10. – С. 3.
13. Picard C. A. Emploi des nouveau materiaux et des nouvelles technologies dans la structure des avions modernes / C. A. Picard // *L'aeronautique et l'astronautique*. – 1988. – № 130. – V. 3. – P. 4 – 29.
14. Habermann A. Metallische Werkstoffe und Fertigungstechnologie fur die Luftfahrt / A. Habermann // *Neue Werkstoffe*. – 1987. – № 22. – V. 36. – P. 37 – 40.
15. Строение и свойства авиационных материалов / А. Ф. Белов, Г. П. Бенедиктова, А. С. Висков и др.; Под ред. акад. А. Ф. Белова. – М.: Металлургия, 1989. – 368 с.
16. Trichett A. In for the long-haul / A. Trichett // *Metal Bulletin Monthly*. – 2000. – January. – P. 26 – 27.
17. Проскуряков А. Г. Исследование возможности формообразования профилей из алура – 41 в кромкогибочных машинах / А. Г. Проскуряков // *Авиационная промышленность*. – 1989. – № 6. – С. 10 – 11.
18. Абдулин Ф. З. Изготовление тонкостенных гнутых профилей из сплава 01420 / Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин и др. // *Авиационная промышленность*. – 1987. – № 3. – С. 34 – 36.
19. Проскуряков, Г.В. Разработка технологии изготовления профилей стесненным изгибом из сплава АБМ – 1 / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков В. И. Филимонов и др. // *Авиационная промышленность*. – 1989. – № 8. – С. 10 – 12.
20. Колганов И. М. Разработка технологии и оборудования для формообразования профилей стесненным изгибом из сплава АБМ – 1 / И. М. Колганов, Б. В. Богданов, А. С. Леукин // *Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли*. – М.: НИАТ, 1992. – С. 69 – 80.
21. !Богоявленский К. Н., Григорьев А. К. Изготовление тонкостенных профилей из титана и его сплавов на профилегибочном стане – В кн.: *Обработка металлов давлением*. – Труды ЛПИ, М.– Л.: Машгиз, 1963, вып. 222 ф. – С.148 – 150.
22. Зажигин А. С. Изготовление профилей и панелей из сплавов ОТ4, ОТ4-1 и ВНС-2 стесненным изгибом / А. С. Зажигин, Г. В. Проскуряков, В. И. Бунин // *Авиационная промышленность*. – 1967. – № 9. – С.26 – 28.
23. Ершов В. И. Изгиб со сжатием в тангенциальном направлении листов из титановых сплавов и стали ВНС-2 / В. И. Ершов // *Авиационная промышленность*. – 1974. – № 8. – С. 46 – 48.
24. Колганов И. М. Изготовление гнутых листовых профилей повышенной жесткости из труднодеформируемых материалов / И. М. Колганов, Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков и др. // *Кузнечно – штамповочное производство*. – 1987. – № 3. – С.18 – 21.

25. Колганов И. М. О достижениях и перспективах развития стесненного изгиба / И. М. Колганов // Сб. Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли. – НИАТ, 1992. – С.5 – 10.
26. Глазунов С. Г. Титан и его сплавы в авиации / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев, Н. Н. Черкасов // Авиационная промышленность. – 1974. – № 1. – С. 9-14.
27. Колганов И. М. Разработка и внедрение процессов формообразования листовых профилей авиационных конструкций стесненным изгибом при волочении: Дисс. канд. техн. наук: 05.07.04. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 296 с.
28. Колганов И. М. Формообразование профилей повышенной жесткости при волочении / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. И. Колганов // Кузнечно – штамповочное производство. – 1982. – № 5. – С.21 – 23.
29. Колганов И. М. Формообразование листовых профилей стесненным изгибом при сочетании процессов волочения и прокатки / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков // Авиационная промышленность. – 1983. – № 1. – С.36 – 38.
30. Колганов И. М. Оптимизация параметров гнутых листовых профилей при стесненном изгибе / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология. – 1986. – № 2. – С. 24 – 30.
31. Протопопов В. Л. Технологические процессы и оборудование для производства гнутых профилей / В. Л. Протопопов // Кузнечно – штамповочное производство. – 1979. – № 6. – С. 6 – 9.
32. Колганов И. М., Москвин А. С., Марковцев В. А. Интенсификация процессов формообразования гнутых профилей из труднодеформируемых алюминий-литиевых сплавов: Тезисы всесоюзной научно-технической конференции «Прогрессивные технологические процессы, оборудование и оснастка в холодноштамповочном производстве». – Пенза: ПДЭНТЗ, 28-29 мая, 1992. – С. 26 – 27.
33. Филимонов, В. И. Интенсификация процесса формообразования стесненным изгибом профилей для авиационных конструкций: Дис. канд. техн. наук: 05.07.04. – Самара: Самарский аэрокосмический ун-т, 1993. – 199 с.
34. Куприн, П. Н. Повышение ресурса и снижение массы транспортных самолетов – важнейшая задача ОКБ и производства: Сборник научных трудов / П. Н. Куприн, И. М. Колганов, А. Н. Антонов. – Ульяновск: УлГТУ, 1999. – С. 45 – 52.
35. Куприн П. Н., Колганов И. М., Антонов А. Н. Снижение массы и повышение ресурса ЛА при внедрении гнутых профилей и перспективных материалов. – М.: МАТИ, 1999. – № 4. – С. 838 – 839.

36. Никольский, Л. А. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов / Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов, Ю. Г. Калинин, А. В. Бахарев. – М.: Машиностроение, 1975. – 285 с.
37. Филимонов В. И. Изготовление методом интенсивного деформирования профилей из листа и их внедрение в авиастроении / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, И. М. Колганов, С. В. Филимонов, М. В. Илюшкин // Авиационная промышленность. – 2001. – № 4. – С. 21 – 23.
38. Филимонов В. И. Перспективные ресурсосберегающие технологии и оборудование для интенсивного формообразования гнутых профилей и гофрированных панелей / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев // Вопросы технологии машиностроения. Материалы выездного заседания Головного Совета «Машиностроение» Министерства образования РФ. – г. Ульяновск, 29 – 30 сентября 2003 года. – С. 44 – 51.
39. Проскуряков Г. В. Исследование стесненного изгиба: Дисс. канд. техн. наук: 05.07.04 – Харьков: Харьковский авиационный институт, 1966. – 195 с.
40. Проскуряков Г. В. Стесненный изгиб / Г. В. Проскуряков // Авиационная промышленность. – 1966. – № 2. – С. 9 – 13.
41. Лизин, В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 1976. – 408 с.
42. Власов, В. И. Краевые задачи в областях с криволинейной границей / В. И. Власов. – М.: ВЦ АН СССР, 1987. – 272 с.
43. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно – штамповочных работ в производстве летательных аппаратов / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
44. Братухин А. Г. Развитие авиационной промышленности в условиях конверсии и рыночной экономики / А. Г. Братухин // Авиационная промышленность. – 1992. – №5. – С. 3 – 7.
45. Современные технологии авиастроения / Коллектив авторов. Под ред. А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
46. Самолеты ближайшего будущего // Гражданская авиация. – 1990. – № 3. – С. 22 – 27.
47. Проскуряков, Г.В. Опыт промышленного изготовления листовых профилей и деталей из них / Г. В. Проскуряков, А. В. Нуждов, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1990. – № 1. – С. 3. – 4.
48. ИЛ-114. Будущее становится ближе / Рекламный буклет Ташкентского АПО им. В. П. Чкалова. – Ташкент, 2004. – 16 с.
49. Duffy P. Hal Ilyushin link on new twinjet / P. Duffy // Flight international. – 2001. – March. – № 13. – V. 19. – P. 16.
50. Ponomarev A. Avion anfibia Be-200 en las pruebas de certificacion / A. Ponomarev // Air fleet (en espanol). – 2000. – № 2 (12). – P. 30 – 32.

51. Russia's prospects in the Latin-American aviation market // Aerospace companies: Catalogue FIDAE, Chile. – Santiago: Los Cerrillos Airport, March, 27/April, 2. – P. 3 – 5.
52. Galvan J. C. Estudios de laboratorio de distintos pretratamientos sobre chapa electrozincada / J. C. Galvan, M. Morcillo // Revista iberoamericana de corrosion y protection. – 1986. – № 4. – V. 17. – P. 284 – 286.
53. The solution precoating / Ravini Enico // Utul. Mach. And Equip. – 1988. – № 107. – V. 20. – P. 19, 20 - 21.
54. Coil coating withstands forming, deep drawing // Modern Metals. – 1989. – № 7. – V. 45. – P. 96 – 100.
55. Timissi Pietro La Finitura Superficiale della lamiera // Rivista Meccanica – 1989. – № 939. – V. 40. – P. 154 – 157.
56. Winship J. R. Finish in first – Then Fabricate / J. R. Winship // Metal forming. – 1989. – № 4. – V. 23. – P. 3 – 4, 10 – 13.
57. Kruger B. Vollverzinkt von Bleche fur den karosserieban / B. Kruger // Blech, Rore, Profile. – 1991. – № 7 – 8. – V. 38. – P. 567 – 569.
58. Neubaner A. Einflusse der Umformvorgangs und der Deckschicht / A. Neubaner, P. J. Bolt, G. – J. Streedland // Bander – Bleche – Rohre. – 1995. – № 9. – V. 36. – P. 36 – 38.
59. Maze E. Developpement des toles prepeintes pour l'industrie automobile / E. Maze, C. Tournillon // Galvano-organo-traitement de surface. – 1991. – № 616. – V. 60. – P. 543 – 550.
60. Carey F. B. Steel cladding profiles: the ever changing scene / F. B. Carey // Sheet Metal Industry. – 1986. – № 8. – V. 63. – P. 466 – 470.
61. Филимонов С. В. Разработка технологии интенсивного формообразования гнутых тонкостенных профилей в роликах: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.05 / Ульяновский государственный технический университет. – Нижний Новгород, 2003. – 223 с.
62. Филимонов В. И. Автоматизированная линия изготовления С – образного профиля методом стесненного изгиба / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев // Вестник УлГТУ. Сер. Машиностроение, строительство. – 1998. – № 2. – С. 50 – 55.
63. Гуров А. Россия и Европейский Союз: состояние и перспективы развития торговли черными металлами / А. Гуров // Металлоснабжение и сбыт. – 1999. – № 2. – С. 52 – 57.
64. Елисеев Ю. Н. Профнастил и металлочерепица: растущий спрос / Ю. Н. Елисеев // Металлоснабжение и сбыт. – 1999. – № 2. – С. 40 – 42.
65. ГОСТ 24045-94. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства.
66. Сортамент холодногнутой профилей из оцинкованной стали для строительства. – М.: НАПСГП, 2002. – 150 с.
67. ТУ 5262-100-02494680-99. Конструкции стальные из гнутых профилей для облицовки наружных стен зданий.

68. ТУ 5262-101-02494680-99. Конструкции металлической облицовки потолков и стен зданий.
69. ТУ 5262-032-02494680-95. Панели стальные бескаркасные с утеплителем для покрытий и стен зданий
70. ТУ 1122-181-024946880- 99. Профили стальные гнутые тонкостенные для строительства.
71. ТУ 5260-065-02494680- 96. Конструкции стальные легкие из гнутых профилей для малоэтажных зданий.
72. ТУ 1120-100-47515705-00. Профили С – образные стальные холодногнутые для строительства.
73. ТУ 1122-075-02494680-2001. Профили стальные холодногнутые для строительства.
74. ТУ 1122-078-02494680-2001. Профили холодногнутые из оцинкованной стали для строительства.
75. ТУ 1122-076-02494680-2001. Профили холодногнутые повышенной жесткости из оцинкованной стали для строительства.
76. ТУ 1122-080-02494680-97. Профили стальные гнутые повышенной жесткости для ограждающих и несущих конструкций.
77. ТУ 1121-029-00110473-98. Профили строительные металлические.
78. ТУ 1108-002-25773051-2000. Профили металлические холоднопрофилированные.
79. Samco-machinery Ltd. [электронный ресурс]: Toronto, Cansds, 2003. – Режим доступа: <http://www.samco-machinery.com>
80. Utited Greengouse Systems, Inc. [электронный ресурс]: Edgerton, USA, 2004. – Режим доступа: <http://www.unitedgreenhouse.com>
81. Производство и применение гнутых профилей проката. Справочник / Под ред. И. С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1975. – 536 с.
82. Тришевский, И.С. Холодногнутые гофрированные профили проката / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда, Я. В. Хижняков. – Киев: Техника, 1973. – 272 с.
83. Гнутые профили проката. Справочник / Под ред. И. С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1980. – 352 с.
84. Маховикова, Г.А. Коммерческая оценка инвестиций / Г.А. Маховикова, И.А. Бужова, В.В. Терехова.–СПб.: Питер-пресс, 2000. – 432 с.
85. Drei Grossen end drei Ausfuhrungen // Industrie-Anzeiger. – 1999. – № 50. – V. 21. – P. 48.
86. Schroder Servo Power Bend: Catalogue. – Wessobrunn-Forst: HS Maschinenbau GmbH, 2004. – 8S.
87. А. с. 176861 СССР, МКИ В21 D 5/06. Устройство для гибки полосы / Г. В. Проскуряков. – Оpubл. 1965, Бюл. № 24.
88. А. с. 385646 СССР, МКИ В21 D 5/06. Устройство для гибки полосы / Г. В. Проскуряков, Д. П. Аникин, Н. И. Гурченков. – Оpubл. 1973, Бюл. № 26.

89. Скрипачев А. В. Изготовление из листа профилей повышенной жесткости стесненным изгибом на кромкогибочных машинах. Дисс. канд. техн. наук. – Тула, 1983. – 242 с.
90. Скрипачев А. В., Проскуряков Г. В., Ренне И. П. Стесненный изгиб – прогрессивный метод изготовления профилированных деталей из листа. – В кн.: Современные методы малоотходной и безотходной технологии в машиностроительном производстве: Тез. докл. республик. конф. – Кишинев, 1982. – С. 92–94.
91. Арышенский Ю. М. Разработка техпроцесса изготовления профилей из волокнистых композиционных материалов системы «Al – сталь» стесненным изгибом / Ю. М. Арышенский, В. Б. Хардин, А. В. Цветков // Авиационная промышленность. – 1990. – № 4. – С. 18 – 21.
92. А. с. 1503165 СССР, МКИ В21 D 5/06. Устройство для гибки / В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков – ДСП: не подлежит опубликованию в открытой печати.
93. А. с. 614845 СССР, МКИ В21 D 5/06. Способ изготовления швеллерообразного профиля / Г. В. Проскуряков, А. В. Скрипачев. – Оpubл. 1978, Бюл. № 26.
94. Колганов И. М. Расширение технологических возможностей формообразования профилей из листовых заготовок / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, Б. В. Богданов и др. // Кузнечно – штамповочное производство. – 1987. – № 8. – С.18 – 20.
95. А. с. 1009559 СССР, МКИ В21 D 5/06. Способ формовки гнутых листовых профилей / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, К. Г. Герман. – Оpubл. 1983, Бюл. № 13.
96. Niebel, B. W. Modern manufacturing process engineering / B. W. Niebel, A. B. Draper, R. A. Wysk. – New York: McGraw–Hill Publishing Company, 1989. – P. 986.
97. Яковлев, С. П. Штамповка анизотропных заготовок / С. П. Яковлев, В. Д. Кухарь. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
98. Ковка и штамповка: Справочник в 4 т. Т.4. Листовая штамповка / Под ред. А. Д. Матвеева. – М.: Машиностроение, 1987. – 544 с.
99. Вдовин С. И. Упругопластический изгиб тонкого листа поперечной силой / С. И. Вдовин, С. В. Семин // Кузнечно – штамповочное производство. – 1995. – № 11. – С. 5 – 7.
100. Вдовин С. И. Прогрессивные технологические процессы гибки листовых заготовок / С. И. Вдовин, Д. В. Голенков, В. А. Жердов, С. В. Семин // Кузнечно – штамповочное производство. – 1998. – № 1. – С. 19 – 21.
101. Ершов В. И. Одновременный изгиб нескольких заготовок / В. И. Ершов, А. С. Красов // Авиационная промышленность. – 1977. – № 10. – С. 41 – 43.

102. Ершов В. И. Гибка листового материала с радиальным противодействием / В. И. Ершов // Авиационная промышленность. – 1977. – № 9. – С. 38 – 41.
103. А. с. 212218 СССР, МКИ В21 D 5/06. Способ гибки профилей из листового материала / Б. М. Алякринский, Г. С. Гумеров, А. Н. Ткаченко. – Оpubл. 1968, Бюл. № 9.
104. Калужский И. И. Гибка листов на малые радиусы / И. И. Калужский, Г. В. Проскуряков // В кн.: Теоретические основы расчетов технологических процессов кузнечно – штамповочного производства. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – С. 74 – 81.
105. Мацнев В. Н. Способ формообразования глубоких гофрированных панелей / В. Н. Мацнев // Авиационная промышленность. – 1983. – № 2. – С. 6 – 8.
106. Ершов В. И. Изгиб идеально пластичной полосы со сжатием в штампе / В. И. Ершов, А. С. Зажигин // Известия вузов. Авиационная техника. – 1972. – № 2. – С. 170 – 173.
107. Комаров А. Д. Развитие и совершенствование процессов штамповки деталей эластичной средой / А. Д. Комаров // Кузнечно – штамповочное производство. – 1982. – № 12. – С. 27 – 30.
108. Комаров А. Д. Разработка и исследование процесса стесненного изгиба листовых заготовок эластичной средой / А. Д. Комаров, В. А. Барвинок, А. А. Шаров, В. К. Моисеев // Кузнечно – штамповочное производство. – 1966. – № 10. – С. 25 – 29.
109. Кисиленко И. А. Исследование и разработка технологии изготовления профилей в штампах последовательного действия всесторонним сжатием / И. А. Кисиленко, Е. Л. Смолин // Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли. – М.: НИАТ, 1992. – С. 42–50.
110. Альперт В. Н. Теоретическое исследование процесса получения профилей при протягивании через инструментальную фильеру металлической ленты с непрерывно скользящим приложением сжимающего усилия в процессе формообразования угла / В. Н. Альперт, Г. В. Проскуряков, А. С. Зажигин // Известия вузов. Авиационная техника. – 1968 – № 3. – С. 107 – 113.
111. Колганов И. М., Проскуряков Г. В. Исследование процесса формообразования профилей стесненным изгибом в инструментальной фильере. – Тольятти, 1979. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ 15.02.79, Д 1096–79.
112. Колганов И. М. Теоретические исследования стесненного изгиба при формообразовании тонкостенных профилей из листа волочением / И.М. Колганов, Г.В. Проскуряков, В.И. Филимонов. – Предприятие Р-6115. Москва, 1985. 6 с. – Деп. в ВИМИ 26 июля 1985 г., № Д06294.

113. Клубович В. В. Влияние схем подвода ультразвуковых колебаний на усилие волочения титановых сплавов / В сб.: Пластичность и обработка металлов давлением. – Минск: Наука и техника, 1974. – С. 74 - 78
114. А. с. 343739 СССР, МКИ В21D5/06. Способ изготовления профилей из труднодеформируемых материалов / Л. А. Никольский, В. Л. Арутюнов, В. И. Кузьмин. – Оpubл. 1972, Бюл. № 21.
115. Колганов И. М. Исследование процесса формообразования профилей стесненным изгибом в роликовых фильерах / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. П. Ломакин // Авиационная промышленность. – 1982. – № 7. – С. 36 – 39.
116. Колганов И.М. Возможности формообразования листовых профилей стесненным изгибом при волочении через роликовую фильеру / И. М. Колганов // Авиационная промышленность. – 1984. - № 9. – С. 36 – 38.
117. Арышенский Ю. М. Способ гибки профилей проглаживанием по пуансону / Ю. М. Арышенский, В. Ю. Ненашев, А. Ю. Матвеев, Ф. В. Гречников // Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли. – М.: НИАТ, 1992. – С. 30–36.
118. Ершов В. И. К расчету процессов формоизменения под действием нескольких нагрузок / В. И. Ершов // Изв. ВУЗов. Сер. Авиационная техника. – Казань, 1980. – №1. – С.103 – 117.
119. Ершов В. И. Изготовление уголковых профилей гибкой с осадкой листовых заготовок / В. И. Ершов, В. Д. Гаврилин, Ю. Р. Медведев // Авиационная промышленность. – 1993. – № 6. – С. 39 – 41.
120. А. с. 1049138 СССР, МКИ В21D5/06. Способ формообразования листовых профилей и устройство для его осуществления / И. А. Кисиленко, Шитарев. – Оpubл. 23.10.83, Бюл. № 39.
121. Ершов, В.И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312с.
122. Проскуряков Г. В. Исследование предельного формоизменения листов из сплава АБМ – 1 при стесненном изгибе / Г. В. Проскуряков, Д. А. Решетников, А. В. Скрипачев, Б. В. Богданов // Авиационная промышленность. – 1985. – № 7. – С. 73 – 74.
123. Шалин Р. Е. Новые материалы для самолетов и двигателей / Р. Е. Шалин // Авиационная промышленность. – 1981. – №3. – С. 17 – 20.
124. Исследование анизотропии заготовок и интенсификация процессов получения профилей методом стесненного изгиба: Техн. отчет / КуАИ; Рук. Ю. М. Арышенский. – № ГР 0186009208; Инв. № 4084. – Куйбышев, 1988. – 81с.

125. Гумеров С. Г. Технологический процесс изготовления профилей прокаткой с осадкой кромок при локальном индукционном нагреве зон пластической деформации / С. Г. Гумеров, И. В. Зверев, М. В. Харитонович, В. Н. Аргунов // Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли. – М.: НИАТ, 1992. – С. 94.
126. Lignes de profilage // Machines et production. – 1999. – № 706. – Р. 67.
127. Гнутые профили проката. Справочник / И. С. Тришевский, Н. М. Воронцов, Ю. В. Дзина и др. – М.: Металлургия, 1967. – 379 с.
128. Roll forming line for USSR // Sheet metal industry. – 1992. – № 9. – V. 68. – Р. 40.
129. 2.500000 pounds contract // Sheet metal industry. – 1992. – № 1. – V. 69. – Р. 26.
130. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали: Справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
131. Аверкиев, А. Ю. Методы оценки штампуемости листового металла / А. Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
132. Филимонов, В. И. Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В. И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 208 с.
133. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др.; Под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
134. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
135. Материаловедение / Под ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
136. Мозберг, Р. К. Материаловедение / Р. К. Мозберг. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.
137. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник / Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
138. Арышенский, Ю. М. Получение рациональной анизотропии в листах / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников, В. Ю. Арышенский. – М.: Металлургия, 1987. – 141 с.
139. Степанов, И. А. Антикоррозионная служба предприятий: Справочник / И. А. Степанов, Н. Я. Савельева, О. Л. Фиговский. – М.: Металлургия, 1987. – 240 с.
140. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник: В 2 т. Т.1 / Под ред. А. А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – 688 с.
141. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас / Под ред. Е. А. Ульянина. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
142. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник: В 2 т. Т.2 / Под ред. А. А. Гера-

- сименко. – М.: Машиностроение, 1987. – 784 с.
143. Арзамасцева Э. А. Применение цинка для нанесения покрытий: обзор, ч. 1 / Э. А. Арзамасцева // Автомобильная промышленность США. – 1995. – № 2. – С. 213.
 144. Kruger B. Vollverzinkt fe Bleche fur den karosserieban / B. Kruger // Blech, Rore, Profile. – 1991. – № 7–8. – V. 38. – P. 567 – 569.
 145. ГОСТ 9.304-84. ЕСЗКС. Покрытия металлизационные. Обозначение, технические требования и методы контроля.
 146. Galvan J. C. Estudios de laboratorio de distintos pret ramientos sobre chapa electrozincada / J. C. Galvan, M. Morcillo // Revista iberoamericana de corrosion y protection. – 1986. – № 4. – V. 17. – P. 284 – 286.
 147. Inagaki J. The peeling off resistance of zinc and iron-zinc coated steel sheets in stamping / J. Inagaki, S. Nakamura, M. Yoshida, A. Nishimoto // SAE Technology Papers. – 1989. – № 890349. – P. 57 – 65.
 148. Ru Z. Formability of galvanized steel sheet / Z. Ru, D. Overby // The 4-th Semin. plast. Umfarung, 16 – 18 june, 1988. – Budapest: Sofia University, 1988 – P. 94 – 99.
 149. Coil coating with stands forming, deep drawing // Modern Metals. – 1989. – № 7. – V. 45. – P. 96 – 100.
 150. Gronostajski J. Z. The zinc coating behaviour during formig at complex strain paths / J. Z. Gronostajski, J. Ali – Wallad // The 4-th Semin. plast. Umfarung, 16 – 18 june, 1988. – Budapest: Sofia University, 1988 – P. 100 – 105.
 151. Колотыркин, Я. М. Металл и коррозия / Я. М. Колотыркин. – М.: Металлургия, 1985. – 88 с.
 152. Carey F. B. Steel cladding profiles: the ever changing scene / F. B. Carey // Sheet Metal Industry. – 1986. – № 8. – V. 63. – P. 466 – 470.
 153. ТУ 14-1-4792-90. Прокат тонколистовой холоднокатаный и горячеоцинкованный с органическим (лакокрасочным, органическим, пластизолевым) покрытием
 154. Корякина, М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Корякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
 155. Корякина М. И. Механизм защитного действия лакокрасочных покрытий / М. И. Корякина // Лакокрасочные материалы. – 1991. – № 6. – С. 49 – 54.
 156. Скульский В. Д. Опыт производства окрашенной рулонной стали на Челябинском заводе профилированного стального настила / В. Д. Скульский, П. Я. Ходоровский, Р. И. Южанина, Б. П. Мандрыгин // ЛКМ. – 1979. – № 2. – С. 52 – 58.
 157. Яковлев, А. Д. Порошковые краски / А. Д. Яковлев. – Л.: Химия, 1987. – 216 с.
 158. Brown D. Pre-painting of aluminium strip by coil coating / D. Brown // Aluminium industry. – 1988. – № 4. – V. 7. – P. 18 – 20.
 159. Coated coil: Not just paint on steel // Modern Metals. – 1990. – № 8. –

V. 46. – P. 86 – 92.

160. Oeterent K. Doppelter Schutz. Schichtverbund and Zink und organischem Decklack verhindert korrosion von Bauteilin / K. Oeterent, V. Albert // Maschinenmarkt. – 1993. – № 21. – V. 99. – P. 54 – 56.
161. Филимонов В. И. Потеря устойчивости боковых полок на предварительных переходах при профилировании / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Техника – экономические проблемы промышленного производства: Тез. докл. международной конф. – Набережные Челны: КамПИ, 2000. – 148 с.
162. Филимонов В. И. Возникновение кромковой волнистости при профилировании / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 2002. – № 1. – С. 32 – 38.
163. Куприн П. Н. Критические углы подгибки плоских тонкостенных полок при профилировании / П. Н. Куприн, И. М. Колганов // Сборник научных трудов ИАТУ. – Ульяновск, 2003. – С. 78 – 81.
164. Куприн П. Н. Влияние на качество гнутых профилей схем формообразования и условий профилирования / П. Н. Куприн, И. М. Колганов, Р. Р. Ахмедзянов // Перспективные методы и средства обеспечения качества летательных аппаратов: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – С. 45 – 52.
165. А. с. 1248690 СССР, МПК⁶ B21D/06. Способ изготовления листовых деталей с отбортовками / В. И. Филимонов, И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков и др. – Опубл. 07.08.1986, Бюл. № 29.
166. Куприн П. Н. Проблемы устойчивости краевых элементов и повышение качества гнутых профилей / П. Н. Куприн, И. М. Колганов, Е. В. Мансуров // Сб. Современные технологии в машиностроении. Научно-практическая конференция. – Пенза, 1999. – С. 117 – 121.
167. ТР 1.4.2023-90. Изготовление профилей и деталей из листовых заготовок сплавов марки 1430 и 1451 методом стесненного изгиба (Технологические рекомендации) / Н. И. Колобнев, И. М. Колганов, В. И. Филимонов и др. – Ульяновск: НИАТ, 1992. – 32 с.
168. Филимонов В. И. Обеспечение натяга при профилировании с целью уменьшения кромковой волнистости / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Современные технологии в машиностроении: Тез. 4 Всероссийской научно – практической конф. – Пенза: ПДЗ, 2001. – С. 163 – 164.
169. Куприн П. Н. Математическая модель устойчивости сжатой полки в рабочем калибре роликовой оснастки / П. Н. Куприн, И. М. Колганов // Авиационная техника. – 2003. – № 2. – С. 51 – 54.
170. Полезная модель 26978 РФ, МПК⁷ B 21 D 5/06. Межклетьевая проводка профилегибочного станка / В. И. Филимонов, В. Е. Гробов, С. В. Филимонов, В. А. Марковцев. – Опубл. 10.01.2003. Бюл. № 10.

171. Филимонов В. И. Влияние касательных напряжений на формирование угловой зоны при стесненном изгибе / В. И. Филимонов, Ю. Н. Берлет, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Механика деформируемых сред в технологических процессах. – Иркутск: ИрГТУ, 2000. – С. 63 – 67.
172. Профили гнutoкатанные из листовых алюминиевых сплавов: Научно – технический отчет № 5448 – 227 – 88. – М.: НИАТ, 1988. – 75 с.
173. РТМ 1.4.1630-86. Технические требования к деталям из листов, профилей и труб. – М.: НИАТ, 1986. – 45 с.
174. Erweiterte Fertigungsmöglichkeiten beim Stanz-Biegen // Blech, Rohre, Profile. – 1997. – № 6. – V. 44. – P. 28 – 29.
175. Dreistern GmbH [электронный ресурс]: Schopfheim: DBR, 2004. – Режим доступа: <http://www.dreistern.com>
176. Developments in roll forming and bending // Welding and metal fabrication. – 1986. – № 8. – V. 54. – P. 354 – 356.
177. Profil – Walzanlagen van Otterloo // Blech – Rohre – Profile. – 1985. – № 10. – V. 32. – P. 569 – 571.
178. Nuevas tecnologias para el perfilado en frio // Novamaquina. – 1986. – № 126. – P. 133 – 137.
179. Stam GmbH [электронный ресурс]: Treviso: Italia, 2004. – Режим доступа: <http://www.stam.it>
180. Il kwang metal forming: Catalog. – Korea:Zeman, 2004. – 52 p.
181. Samco Ltd [электронный ресурс]: Treviso: Italia, 2004. – Режим доступа: <http://www.sintech.com>.
182. Cometal: Lignes de profilage: Catalogue. – Grasse: Cometal, 2004. – 24 p.
183. Formach: Impianti di profilatura: Pubblicitario. – Roma: Formach, 2004. – 6 p.
184. Schleich: Innovation for roof and wall: Ad-booklet. – Fiedewald: Schleich, 2004. – 28 p.
185. Additional services // Sheet metal industry. – 1992. – № 1. – V. 69. – P. 26.
186. Thirty years of roll forming // Sheet metal industry. – 1992. – № 1. – V. 69. – P. 24.
187. Doppel – Profiliermaschine verkupft mit Langsbiegemaschine // Bänder, Blech, Rohre. – 1992. – № 4. – V. 33. – P. 90.
188. Roll forming seeks a high profile // Sheet metal industry. – 1991. – № 9. – V. 68. – P. 18 – 20.
189. Альта-Транс: Оборудование для производства фасонных изделий из металла: Каталог. – М.: Альта-Транс, 2004. – 12 с.
190. ООО «Аркада» [электронный ресурс]: Смоленск: РФ, 2004. – Режим доступа: <http://www.arkada.ru>

191. Patent 4327252 Germany, ISSN F 16 S 1/04. Blechprofilteil mit Sicke / Alfons Jean Knauf . – Ver. 16.02.95.
192. Скоков Ф. И. Разработка и освоение технологии производства уголкового профиля с отбортовками / Ф. И. Скоков, С. В. Колоколов, М. Е. Докторов, В. В. Клепанда // Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката. – Харьков: УкрНИИмет, 1970. – № 15. – С. 277 – 283.
193. Тришевский И. С. Исследование процесса и разработка режима профилирования несимметричных гнутых профилей / И. С. Тришевский, В. И. Мирошниченко // Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката. – Харьков: УкрНИИмет, 1970. – № 15. – С. 155 – 173.
194. Bogojawlenski K. N. Technologie der Fertigung von Leichtbauprofilen / K. N. Bogojawlenski, A. Neubauer, V. W. Ris. – Leipzig: VEB DVG, 1979. – 566 p.
195. Патент 1819170 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления сортовых гнутых профилей / А. П. Игнатенко, В. В. Клепанда, С. Н. Михайлов и др. – Оpubл. 30.05.93, Бюл. № 20.
196. А. с. 1625544 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства несимметричного уголкового профиля / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, Н. Т. Пахомов, А. А. Ушаков. – Оpubл. 07.02.91, Бюл. № 5.
197. А. с. 1690890 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ поштучного профилирования уголков / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, Р. И. Кириллов, А. А. Ушаков. – Оpubл. 15.11.91, Бюл. № 42.
198. А. с. 1748903 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / Г. В. Проскуряков, В. А. Марковцев, С. Г. Семин. – Оpubл. 23.07.92, Бюл. № 27.
199. Проскуряков Г. В. Классификация схем формообразования профилей стесненным изгибом при гибке прокаткой / Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин, Э. М. Каримов // Авиационная промышленность. – 1990. – № 6. – С. 9 – 11.
200. А. с. 1388141 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления V – образных гнутых профилей / Н. В. Пшеничная, М. Е. Докторов, Э. В. Кузмин и др. – Оpubл. 15.04.88, Бюл. № 14.
201. Тришевский, И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
202. А. с. 1019727 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления несимметричных гнутых профилей / И. С. Тришевский, А. П. Антипенко, Э. С. Дахновский и др. – Оpubл. 23.12.83, Бюл. № 47.

203. А. с. 1484403 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления тонкостенных гнутых профилей / А. А. Посадских, Г. Г. Солоденко. – Оpubл. 07.06.89, Бюл. № 21.
204. А. с. 1703217 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых неравнополочных швеллеров / Р. И. Кирилов, В. Г. Антипанов, В. В. Пахарев, В. И. Гридневский. – Оpubл. 17.01.92, Бюл. № 1.
205. А. с. 942306 СССР. Способ изготовления неравнополочных гнутых профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 07.10.83, Бюл. № 37.
206. А. с. 1291237 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления сортовых гнутых профилей / А. Л. Игнатенко, Я. В. Хижняков, А. П. Антипенко и др. – Оpubл. 23.02.87, Бюл. № 7.
207. Патент 1431158 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей проката типа швеллеров с гофрами жесткости / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, В. Н. Кочубеев и др. – Оpubл. 15.12.94, Бюл. № 23.
208. А. с. 1676708 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ формовки неравнополочных швеллерных профилей / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, А. П. Янчинский, Н. Т. Пахомов. – Оpubл. 15.09.91, Бюл. № 34.
209. А. с. 1328029 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства профилей высокой жесткости / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. Н. Кочубеев и др. – Оpubл. 07.08.87, Бюл. № 29.
210. А. с. 1334463 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / В. И. Федосеенко, В. В. Клепанда, В. В. Тишков и др. – Оpubл. 23.02.90, Бюл. № 7.
211. А. с. 1634347 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей проката / О. В. Марьин, Е. Н. Горбач, В. Н. Босый и др. – Оpubл. 15.03.91, Бюл. № 10.
212. А. с. 1191138 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых неравнополочных профилей со ступенчатой стенкой / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная и др. – Оpubл. 15.11.85, Бюл. № 42.
213. А. с. 1299646, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / М. Е. Докторов. – Оpubл. 30.03.87, Бюл. № 12.
214. Патент 2059451 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ изготовления тонкостенных профилей из полосовых заготовок / И. В. Зверев, С. Г. Гумиров, С. Ю. Жаринов. – Оpubл. 10.05.96, Бюл. № 13.
215. ТР 1.4.1780 – 87 Изготовление профилей из плакиров. листов алюминиевых сплавов Д164, 1163 и В95 пч методом стесненного изгиба / Г.В. Проскуряков, А.С. Москвин, В.И. Филимонов и др. – М.: НИ-АТ, 1987. – 19 с.

216. РТМ 1.4.2005 – 90. Изготовление профилей из листов алюминиевых сплавов Д16, В95, 1420 методом стесненного изгиба / Ю. М. Арышенский, Г. В. Проскуряков В. И. Филимонов и др. – М.: НИАТ, 1991. – 85 с.
217. А. с. 1169772 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей проката / В. И. Филимонов, Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков, Б. Н. Глухов. – Оpubл. 30.07.85, Бюл. № 28.
218. А. с. 1003962 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей / И. С. Тришевский, Я. В. Хижняков, В. Ф. Гробин и др. – Оpubл. 15.03.83, Бюл. № 10.
219. Патент 2037352 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутого корытного профиля / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, В. Ф. Афанасьев, С. А. Шубкин. – Оpubл. 01.06.99, Бюл. № 6.
220. А. с. 863064 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 25.09.81, Бюл. № 34.
221. А. с. 1757162 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления тонкостенных корытообразных профилей из листовых заготовок и устройство для его реализации / И. М. Колганов, А. С. Башилов, В.И. Филимонов и др. – Оpubл. 16.06.90. ДСП.
222. А. с. 755369 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 15.08.80, Бюл. № 30.
223. А. с. 1637901 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства корытного профиля / В. И. Гридневский, А. А. Ушаков, В. Г. Антипанов, Н. Т. Пахомов. – Оpubл. 30.03.91, Бюл. № 12.
224. А. с. 1172626 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления несимметричных гнутых листовых профилей проката / И. С. Тришевский, В. Г. Антипанов, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 15.08.85, Бюл. № 30.
225. Проскуряков, Г. В. Исследование и разработка способа изменения кривизны профиля при стесненном изгибе / Г.В. Проскуряков, Е. Н. Чебурахин, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 9 – 13.
226. Патент 2006315 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутого корытного профиля / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. Ф. Рашников, В. В. Пахарев. – Оpubл. 30.01.94, Бюл. № 2.
227. А. с. 1780896 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых корытных профилей / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. К. Визгалов, А. А. Ушаков. – Оpubл. 15.12.92, Бюл. № 46.
228. А. с. 1754266 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых тонкостенных профилей / Н. М. Волковой, И. А. Приходько, В. В. Костицын и др. – Оpubл. 15.08.92, Бюл. № 30.

229. Патент 1817717 СССР, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ поштучного производства гнутого корытного профиля с отбортовками горизонтальных полок / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, А. А. Ушаков и др. – Оpubл. 23.05.93, Бюл. № 19.
230. А. с. 1731348 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления профилей с отбортовками / Г. Р. Хейфец, В. Б. Калужский, Б. Н. Сидоренко, Г. И. Безкоровайный. – Оpubл. 07.05.92, Бюл. № 17.
231. А. с. 1726086 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Гнутый профиль и способ его производства / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, А. И. Стариков и др. – Оpubл. 15.04.92, Бюл. № 14.
232. Патент 2019335 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей из труднодеформируемых алюминиевых сплавов / И. М. Колганов, Б. В. Богданов, А. С. Башилов и др. – Оpubл. 15.09.94, Бюл. № 17.
233. Патент 2118213 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства С – образного гнутого профиля / В. Г. Антипанов, М. Ф. Сафронов, С. В. Кривоносов, В. Л. Корнилов. – Оpubл. 25.06.97, Бюл. № 24.
234. Патент 1793895 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых коробчатых профилей / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, Ф. В. Рашников, В. В. Пахарев. – Оpubл. 07.02.93, Бюл. № 5.
235. А. с. 916017, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Г. В. Олейник и др. – Оpubл. 30.03.82, Бюл. № 12.
236. Патент 1831396 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ производства гнутых С – образных профилей / А. А. Ушаков, В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, Н. Т. Пахомов. – Оpubл. 30.07.93, Бюл. № 28.
237. А. с. 1634348 Россия, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления С – образных профилей / М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная, Э. В. Кузьмис. – Оpubл. 15.03.91, Бюл. № 10.
238. А. с. 1466831 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / М. Е. Докторов, Э. В. Кузьмис, Н. В. Пшеничная, И. Б. Менович. – Оpubл. 23.03.89, Бюл. № 11.
239. А. с. 1606225 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / М. Е. Докторов, Е. Н. Горбач, Г. В. Олейник и др. – Оpubл. 15.11.90, Бюл. № 42.
240. А. с. 1579603 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления замкнутых сварных гнутых профилей с гофрами на боковых стенках / М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная, Е. И. Кириенко – Гринь и др. – Оpubл. 23.07.90, Бюл. № 27.
241. А. с. 1696042 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых тонкостенных профилей / Н. Л. Волковой, Р. Ю. Дебердеев, А. И. Клементьева и др. – Оpubл. 7.12.91, Бюл. № 45.
242. А. с. 1655598 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых

- профилей / В. М. Щеглов, В. Я Тишков, Г. Е. Барабанцев, В. Т. Рябинков. – Оpubл. 15.06.91, Бюл. № 22.
243. А. с. 1563804 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления сварных замкнутых профилей / В. Т. Рябинков, Г. Е. Баранцев, А. Л. Тюляпин и др. – Оpubл. 15.05.90, Бюл. № 18.
244. А. с. 1498577 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления замкнутых профилей коробчатого типа / Н. И. Конюков, А. И. Гулько, В. М. Фролов и др. – Оpubл. 07.08.89, Бюл. № 29.
245. А. с. 837467 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей замкнутого и полузамкнутого сечения / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 15.06.81, Бюл. № 22.
246. А. с. 837466 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления профилей замкнутого и полузамкнутого сечения / И. С. Тришевский, А. Н. Коновалов, Э. С. Дахновский и др. – Оpubл. 15.06.81, Бюл. № 22.
247. А. с. 294406 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей коробчатого сечения / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. В. Клепанда, А. Н. Коновалов. – Оpubл. 13.09.72, Бюл. № 27.
248. А. с. 1547914 СССР, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления зетовых равнополочных профилей / М. Е. Докторов, С. В. Мирошниченко, С. А. Батурин и др. – Оpubл. 07.03.1996, Бюл. № 9.
249. А. с. 1519812 СССР, МПК⁶ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых зетовых профилей проката / М. Е. Докторов, С. В. Мирошниченко, С. А. Батурин, С. А. Чиж. – Оpubл. 07.11.1989, Бюл. № 41.
250. А. с. 1625543 СССР, МПК⁶ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых неравнополочных зетовых профилей / М. Е. Докторов, С. В. Мирошниченко, Е. Н. Горбач и др. – Оpubл. 07.02.1991, Бюл. № 5.
251. Патент 2148451 РФ, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутого неравнополочного профиля / М. Ф. Софронов, В. Г. Антипанов, В. Л. Корнилов и др. – Оpubл. 10.05.2000.
252. Patent 5983691 US, NPC 72/178 (МПК⁶ В 21 D 5/08). Roll-forming machine / K. E. Voth, P. E. Bradbury. – Published 16.11. 1999.
253. Patent 6434994 US, NPC 72/178 (МПК⁶ В 21 D 5/08). Roll-forming machine / P. E. Bradbury, K. E. Voth, W. Fisher. – Published 20.08. 2002.
254. А. с. 1148667 СССР, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых зет-образных профилей / А. И. Гулько, В. Ф. Светличный, А. К. Антонюк и др. – Оpubл. 07.04.1985, Бюл. № 12.
255. А. с. 1118448 СССР, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых Z – образных профилей / А. И. Гулько, В. Ф. Светличный, А. Ф. Земцов и др. – Оpubл. 15.10.1984, Бюл. № 38.
256. Dimos, P. Z – sections with sloping edge stiffness under axial load / P. Dimos, S. Asnona // Research in Structural Engineering. – 1990. – № 2. – V. 116. – P. 400 – 406.

257. А. с. 1480919 СССР, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления полузамкнутых Z – образных профилей / В. Н. Николаев, А. И. Гулько, В. Ф. Светличный и др. – Оpubл. 23.05.1989, Бюл. № 19.
258. Колганов, И. М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования / И. М. Колганов. – Ульяновск: Изд. УлГТУ, 2001. – 108 с.
259. А. с. 314579 СССР, МПК В21 Д5/08. Способ изготовления профилей с элементами двойной толщины / И. С. Тришевский, В. В. Стукалов, В. В. Клепанда, В. И. Миращенко. – Оpubл. 21.09.71, Бюл. №28.
260. А. с. 749489 СССР, МПК 3 В21 Д5/08. Способ изготовления гнутых профилей проката с элементами двойной толщины у кромок / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Г. В. Олейник, Н. В. Пшеничная и др. – Оpubл. 23.07.80, Бюл. №27.
261. А. с. 1278059 СССР, МПК 4 В21 Д5/06. Способ изготовления несимметричных гнутых профилей / Ю. Н. Головня, Н. Л. Волковой, В. Н. Илюшко. – Оpubл. 23.12.86, Бюл. №47.
262. А. с. 978973 СССР, МПК 3 В21 Д5/08. Способ изготовления гнутых профилей / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда, Ю. Н. Головня, В. М. Щеглов и др. – Оpubл. 07.12.82, Бюл. №45.
263. А. с. 1315076 СССР, МПК 4 В21 Д5/06. Способ изготовления несимметричных гнутых профилей / Ю. Н. Головня, Н. Л. Волковой, Ф. М. Багненко, А. А. Мильто. – Оpubл. 07.06.87, Бюл. №21.
264. А. с. 1269878 СССР, МПК 4 В21 Д5/08. Способ изготовления гнутых профилей / И. С. Тришевский, Ю. Н. Головня. – Оpubл. 15.11.86, Бюл. №42.
265. А. с. 1489883 СССР, МПК 4 В21 Д5/06. Способ изготовления полузамкнутых гнутых профилей / Н. Л. Волковой, А. Н. Коновалов, Я. В. Хижняков, Н. И. Дружинская и др. – Оpubл. 30.06.89, Бюл. №24.
266. Патент 2025163 РФ, МПК 5 В21 Д5/06. Способ изготовления полузамкнутых гнутых профилей / Н. Л. Волковой, Н. И. Дружинская, Т. П. Ветафова, Н. С. Фиоктистов и др. – Оpubл. 30.12.94, Бюл. №24.
267. А. с. 1750777 СССР, МПК 5 В21 Д5/06. Способ изготовления полузамкнутых гнутых профилей / Н. Л. Волковой, В. С. Колоколов, И. С. Мамаев, В. Ф. Копылов и др. – Оpubл. 30.07.92, Бюл. №28.
268. А. с. 1731347 СССР, МПК 5 В21 Д5/06. Способ изготовления гнутых профилей коробчатой формы / Г. Р. Хейфец, В. Б. Калужский, Б. Н. Сидоренко, Г. И. Безкоровайный. – Оpubл. 07.05.92, Бюл. №17.
269. А. с. 1632560 СССР, МПК 5 В21 Д5/06. Способ изготовления гнутых профилей проката / Г. Р. Хейфец, В. Б. Калужский, В. В. Клепанда и др. – Оpubл. 07.03.91, Бюл. №9.
270. А. с. 543445 СССР, МПК 3 В21 Д5/06. Способ изготовления профилей / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, М.Е. Пацека. – Оpubл.

25.01.77, Бюл. №3.

271. Ренне, И.П. Пластический изгиб листовой заготовки / И.П. Ренне // Труды Тульского механического ин-та. – 1950. – Вып.4. – С. 146 – 162.
272. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
273. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов – М.: Машиностроение, 1968. – 283 с.
274. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением. / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
275. Давыдов, В.И. Производство гнутых тонкостенных профилей / В.И. Давыдов, М.П. Максаков. – М.: Металлургиздат, 1959. – 240 с.
276. Вольмир, А.С. Устойчивость упругих систем / А.С. Вольмир. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 880 с.
277. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
278. Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
279. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
280. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
281. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
282. Матвеев, А.Д. Деформация при крутом знакопеременном изгибе листа с неизменной толщиной / А.Д. Матвеев. // Известие вузов. Машиностроение. – 1984. – № 1. – С. 11 – 15.
283. Судзуки, Х. Изучение формы изделия, имеющего дугообразное сечение / Х. Судзуки, М. Киути, К. Такада // Сосэй то како. – Т. 15. – № 165. – С. 820 – 828. – Перевод с яп. № 11802/7Б. – Харьков: УкрНИИмет, 1976. – 22 с.
284. Кокадо, Д. О возникновении кромковой волнистости при холодном профилировании дуговых желобчатых сечений с боковыми фланцами / Д. Кокадо, Е. Онода //Труды ун-та г. Киото. Инженерный факультет. – 1977. – Т. 39. – № 2. – С. 225 – 244. — Перевод с яп. № А – 67428. – М.: ВЦП НТЛД, 1978. – 31 с.
285. Стрельбицкая, А.И. Изгиб прямоугольных пластин за пределами упругости / А.И. Стрельбицкая, В.А. Колгалин, С.И. Матошко. – Киев: Наукова думка, 1971. – 244 с.
286. Матвеев, А.Д. Пластический изгиб листа при неизменной толщине / А.Д. Матвеев. – Известия вузов: Машиностроение, 1983. - № 1. – С. 12 – 18.
287. Малинин, Н.Н. Пластический изгиб листа при больших деформаци-

- ях / Н.Н. Малинин, А.А. Ширшов. – Известия вузов: Машиностроение, 1965. - № 8. – С. 187 – 192.
288. Богоявленский, К.Н. Разработка методики расчета основных параметров процесса изготовления гнутых профилей / К.Н. Богоявленский, И.П. Манжурич, В.В. Рис. – Изготовление деталей пластическим деформированием. Под ред. К.Н. Богоявленского. – Л.: Машиностроение, 1975. С. 383 – 396.
 289. Алексеев, Ю.Н. Пластический изгиб при формообразовании гофрированных панелей методом стесненного изгиба / Ю.Н. Алексеев. – Самолетостроение и техника воздушного флота. – Харьков: ХГУ, 1968. - № 16. – С. 79 – 84.
 290. Гоффман, О. Введение в теорию пластичности для инженеров / О. Гоффман, Г. Закс. – М.: ГНТИМЛ, 1957. – 279 с.
 291. Матвеев, А.Д. Пластический изгиб многослойного листа при заданном изменении толщины / А.Д. Матвеев. – Известия вузов: Машиностроение, 1983. - № 2. – С. 17-22
 292. Пацека, И.К. Исследование напряженного состояния металла при изгибе со сжатием / И.К. Пацека, В.В. Ланько, Ю.Н. Головня, Э.М. Темников. – Гнутые профили проката: Сборник трудов УкрНИИмет. – Харьков: УкрНИИмет, 1974. - № 2. – С. 118 123.
 293. Проскуряков, Г.В. Гипотеза ортогональности и метод осреднения в задачах плоской пластической деформации / Г.В. Проскуряков. – Тольятти: ТПИ, 1981. – 17 с. – Деп. в ВИНТИ 14.01.81. - № 175-81.
 294. Боголюбов, Н.Н. Асимптотические методы теории нелинейных колебаний / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 504 с.
 295. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке /В.П. Романовский – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
 296. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности /Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
 297. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения /Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 312 с.
 298. Малинин, Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Высшая школа, 1979. – 119 с.
 299. El-Domaty, A. Bending of work-hardening metals under the influence of axial load / A. El-Domaty, A.H. Shabaik. – Journal of Mechanical Working Technology, 1984. - № 10. – P. 57 – 66.
 300. Арышенский, Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский. – Саратов: СГУ, 1973. 111 с.
 301. Ашкенази, Е.К. Анизотропия конструкционных материалов / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 247 с.
 302. Тихонов В.С. Прокатка цинка / В.С. Тихонов. – М.: Металлургия, 1963. – 200 с.
 303. Микляев, Н.Г. Анизотропия механических свойств материалов / Н.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. – М.: Металлургия, 1969. – 296 с.

304. Голавлев, В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки / В.Д. Голавлев. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
305. Angarbeit, H. Theoretische und experimentelle Ermittlung des minimal zulassigen Biegeradius beim profilieren von Breitband / H. Angarbeit, F. Richter, H. Richter. – Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischer Hochschule Otto von Guericke. – Magdeburg, 1977. – Vol. 21. - № 8. – S. 803 – 806.
306. Смирнов-Аляев, Г.А. Критерии пластичности, степени деформируемости и начала разрушения металлов в инженерных расчетах процессов обработки давлением / Г.А. Смирнов-Аляев. – Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. – М.: ГНТИЛЧЦИ, 1964. – С. 38 – 44.
307. Прудников, М.И. Разрушение и минимальный радиус изгиба / М.И. Прудников. – Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. – М.: ГНТИЛЧЦИ, 1964. – С. 323 – 326.
308. Макклиток Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклиток, А. Аргон. – М.: Мир, 1970. – 443 с.
309. Херцберг, Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р.В. Херцберг. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
310. Rousselier, G. Rupture en plasticite. Resultats theoriques en vue de la formation des criteres / G. Rousselier. – Revue francaise de la mecanique, 1983. – № 3.– P. 25 – 34.
311. Zak, M. Mathematical model of wrinkling phenomenon in structures / M. Zak. – Math. Model. Sci. and Technol.: 4-th Int. Conf. – Zurich, 15-17 Aug., 1983. – New York, 1983. – P. 573 – 578.
312. Аверкиев, Ю.А. Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
313. Филимонов, В.И. Обеспечение заданной точности поперечного сечения профиля при гибке в роликах / В.И. Филимонов, С.В. Филимонов, В.А. Марковцев // Сб. научных трудов УлГТУ: Перспективные методы и средства обеспечения качества летательных аппаратов. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – С. 164 – 169.
314. Филимонов, В.И. Определение протяженности зоны плавного перехода при формообразовании профиля стесненным изгибом / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, А.С. Москвин // Авиационная промышленность, 1992. – № 7. – С.5 – 8.
315. Романенко, В.П. Мини-станы для производства тонкостенных гнутых профилей / В.П. Романенко, Е.А. Харитонов, Д.В. Нестеров // Производство проката, 2000. - № 7. – С. 24 – 26.
316. Тришевский, И.С. О продольной деформации металла подгибаемых элементов на участке плавного перехода / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов // Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния металла при профилировании и энергосиловых параметрах процесса: Отрасл. сб. науч. тр. – Харьков:

УкрНИИМет, 1975. – С. 16 – 34.

317. Bhattacharyya, D. The prediction of deformation length in cold roll-forming / D. Bhattacharyya, P.D. Smith, L.F. Collins // *Journal of Mechanical Working Technology*, 1984. – V. 9. - № 2. – P. 181 – 191.
318. Damm, K. Ermittlung von Längsänderung beim Walzprofilieren durch mathematische Beschreibung des Bandkantenverlaufs/ K. Damm, X. Wang // *Industrie Anzeiger*, 1987. – V. 9. – № 2. – S. 39 – 40.
319. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / Под ред. И.С. Тришевского. – Киев:Техника, 1980. – 535 с.
320. Тришевский, И.С. О возникновении гофров в процессе образования гнутых профилей проката / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. – Обработка металлов давлением в машиностроении. – Вып. 9. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. – С. 23-30.
321. Тришевский, И.С. Исследование профилирование в валках, создание и освоение промышленной технологии производства гнутых профилей проката /И.С. Тришевский // Автореферат дисс. д-ра техн. наук. – Харьков: УкрНИИМет, 1967. – 42 с.
322. Бурыкин, А.А., О процессе образования гофров на гнутых профилях / А.А. Бурыкин // *Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением*. – М.: ГИТИЛЧЦМ, 1964. – С. 321 – 329.
323. Алфутов, Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н.А. Алфутов. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.
324. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
325. Киути, М. Проблемы и оптимизация профилирования в валках / М. Киути // *Сосэй то како*, 1974. – Т. 15. – № 165. – С. 811 – 819. – Пер. с яп. № 11802/74. – Харьков: УкрНИИМет, 1976. – 32 с.
326. Киути, М. Современное состояние CAD/CAM в области профилирования в валках / М. Киути // *Сосэй то како*, 1986. – Том 27. – № 300. – С. 184 – 192. – Перевод с яп. № Б–100/3. – Киев: ТПП УССР, 1987. – 21 с.
327. Стукалов, В.П. Предотвращение волнистости на профилях с покрытием / В.П. Стукалов, Э.С. Дахновский, В.И. Мирошниченко, А.Б. Юрченко // *Разработка и исследование технологии производства гнутых профилей проката*. – Харьков: УкрНИИМет, 1984. – С. 99 – 100.
328. Стукалов, В.П. Основные принципы проектирования калибровок валков для формовки профилей с элементами двойной толщины / В.П. Стукалов // *Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния металла при профилировании и энергосиловых параметрах процесса: Отрасл. сб. науч. тр.* – Харьков: УкрНИИМет, 1975. – С. 102 – 106.

329. Новиков, В.И., Исследование несущей способности и определение местной устойчивости тонкостенных элементов из замкнутых сварных профилей с гофром / В.И. Новиков, Э.Ф. Гарф, А.Е. Литвиненко // Теория и технология производства гнутых профилей проката. – Харьков: УкрНИИМет, 1982. – С. 88 – 93.
330. Ренне, И.П. Об одной форме потери устойчивости при обжиге тонкостенных труб из сильно нагартованного металла / И.П. Ренне, Т.И. Ренне // Технология машиностроения, вып. 9. – Тула: Изд-во ТПИ, 1970. – С. 65 – 71.
331. Лысов, М.Н. теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.Н. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
332. Тришевский, О.И. Анализ процесса формообразования профилей высокой жесткости методом конечных элементов / О.И. Тришевский, Ю.А. Плеснецов, Г.Г. Карабанов, Е.Г. Полстянкин // Совершенствование технологии производства сортового проката и гнутых профилей: Отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1989. – С. 22 – 27.
333. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
334. Серавкин, А. COPRA Rollform – проектирование роликовой оснастки и оптимизация холодного проката профилей, труб и профнастилов. Часть 1. Открытие и асимметричные сечения / А. Серавкин. – САПР и графика, 2004. - № 1. С. 33 – 37.
335. Серавкин, А. COPRA Rollform – проектирование роликовой оснастки и оптимизация холодного проката профилей, труб и профнастилов. Часть 2. Производство профнастилов / А. Серавкин. – САПР и графика, 2004. - № 2. С. 72 – 77.
336. Oesten, U. Die kontinuierliche Fabrikation von Blechprofilen / U. Oesten // Blech, Rohre, Profile, 1979. – Vol. 26. - № 3. – S. 112-116.
337. Yang, S. Concurrent design of sheet metal forming product and process / S. Yang, K. Nezu // Trans. ASME: J. Manuf. Sci. And Eng., 1999. – 121, № 2. – P. 189 –194.
338. Hua, M. Large deflection analysis of elastoplastic plate in steady continuous roll bending process /M. Hua, Y.H. Lin // Int. J. Mech. Sci. – 1999. – v.41. – № 12. – P.1461 – 1483.
339. Moller, V. Den Umformprozess am PC effizient simulieren / Verner Moller // Industrie Anzeiger, 1996. – v. 118, № 46. – S. 26.
340. Березовский, С. Ф. Производство гнутых профилей / С. Ф. Березовский. – М.: Металлургия, 1985. – 200 с.
341. Марковцев, В.А. Изготовление профилей с бортами малой высоты / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Труды Всероссийской конференции «Современные технологии в машино-

строении – 2000» – Пенза: ПДПЗ. – 2000. – ч.1. – С. 25 – 28.

342. Проскуряков, А. Г. Классификация способов изготовления профилей из слоистых алюмополимерных композиционных материалов / А. Г. Проскуряков, О. Г. Сенаторова // *Авиационная промышленность*. – 1993. – № 2. – С. 3 – 4.
343. Филимонов, В. И. К расчету технологических параметров при гибке прокаткой с аксиальным сжатием / В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, В. А. Марковцев, И. М. Колганов // *Вопросы авиационной науки и техники. Сер. «Авиационная технология»*. – 1986. – № 1. – С. 44 – 47.
344. Филимонов, С.В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.
345. Марковцев, В.А. Выбор диаметров роликов для формообразования профиля стесненным изгибом / В.А. Марковцев, Г.В. Проскуряков, Г.В. Коновалов. // *Авиационная промышленность*. – 1990. – № 8. – С. 8 – 9.
346. Марковцев, В.А., Выбор схемы правки профилей при их формообразовании методом стесненного изгиба / В.А. Марковцев, Г.В. Проскуряков. // *Авиационная промышленность*. – 1988. – № 7. – С. 31 – 37.
347. Марковцев, В.А. Правильное устройство профилегибочной линии 4MIS–10 японской фирмы NAKATA /В.А. Марковцев. // *Авиационная промышленность* – 1985. – № 11. – С. 89.
348. Илюшкин, М.В. Способы улучшения качества поверхности гнутых профилей с покрытием при профилировании / М.В. Илюшкин, В.А. Марковцев, В.И. Филимонов. // *Труды 4 Всероссийской научно–практической конференции «Современные технологии в машиностроении»*. – Пенза: ПДЗ, 2001. – С. 91–93.
349. Марковцев, В.А. Напряжения в подгибаемых полках при профилировании / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // *Технико–экономические проблемы промышленного производства: Тез. докл. международной конф.* – Набережные Челны: КамПИ, 2000. – С. 51.
350. Филимонов, В. И. Использование гипотезы ортогональности в одной задаче стесненного изгиба / В. И. Филимонов. – Ульяновск, 1984. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 16.04.84, № 2366 – 84.
351. Филимонов, В. И. Напряженное состояние при стесненном изгибе / В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин // *Сборник трудов КАИ «Пластическое формоизменение деталей авиационной техники. Сер. «Авиационная технология»*». – 1987. – С. 38 – 43.
352. Горлач, Б.А. Использование метода конечных элементов в задачах формообразования профилей стесненным изгибом / Б. А. Горлач, Е.

- А. Ефимов, В. И. Филимонов // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. «Авиационная технология». – 1990. – № 1. – С. 3 – 8.
353. Филимонов, В. И. О граничных условиях в задачах гибки с торцевым поджатием / В. И. Филимонов, А. А. Гуляев // Авиационная промышленность. – 1987. – № 4. – С. 54 – 55.
354. Погорелов, А.В. Аналитическая геометрия /А.В. Погорелов. – М: Наука, 1977. – 208 с..
355. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 831 с.
356. Филимонов, В. И. Разработка модулей подсистемы САПР директивной технологии и роликовой оснастки под стесненный изгиб / В. И. Филимонов // Тезисы докладов семинара «Оборудование, технология и организация цехов по производству профильной продукции и ТНП». – Пенза : ПДНТП, 1991. – С. 17 – 18.
357. Филимонов, В. И. О структуре системы CAD/CAM для профилирования в роликах / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Ресурсосберегающие технологии листовой и объемной штамповки : Тезисы Всероссийской научно – технической конференции. – Ульяновск, 14 – 17 октября, 1997. – С. 68 – 69.
358. Филимонов, В. И. Стесненный изгиб и граничные условия / В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин, И. М. Колганов // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. «Авиационная технология». – 1986. – № 1. – С. 44 – 47.
359. Ильин, В.А. Аналитическая геометрия / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк. – М.: Наука, 1971. – 232 с.
360. Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
361. Филимонов, В. И. Касательные напряжения при стесненном изгибе / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 2000. – № 4. – С. 30 – 35.
362. Фрейденталь, А. Математические теории неупругой сплошной среды / А. Фрейденталь, Х. Гейрингер. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 432 с.
363. Cevallos, G. Determinación de las curvas límite de deformación en chapa de aluminio de fabricación local /G. Cevallos, G. Rosero, I. Yumbia // Politecnica. - 1988. - V. 13. - №1. - P. 75-86.
364. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
365. Колганов, И.М. Применение модели пластического формоизменения / И.М. Колганов, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Авиационная промышленность. – 1996. – № 3 – 4. – С. 26 – 30.
366. Экспериментальное исследование процесса и разработка технологических рекомендаций по изготовлению профилей методом стесненного изгиба из сплава 01420, Д 16чТВ, В96 : Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин. –

№ ГР Ф27468. – М. : НИАТ, 1987. – 50 с.

367. Исследование, разработка и освоение оборудования и технологических процессов изготовления длинномерных профилей и деталей из перспективных алюминиевых сплавов: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин, В. А. Марковцев. – № ГР 035054. – М. : НИАТ, 1987. – 46 с.
368. ТР 1.4.1624-86. Изготовление гнутых профилей методом стеснённого изгиба из сплава 01420./ Проскуряков Г.В., Филимонов В.И., Москвин А.С., - НИАТ, 1986. - 26 с.
369. ТР 1.4.1780-87. Изготовление профилей из плакированных листов алюминиевых сплавов Д16ч, 1163, В95пч методом стеснённого изгиба./ Проскуряков Г.В., Филимонов В.И., Москвин А.С., Марковцев В.А., - НИАТ, 1987. - 22 с.
370. А. с. 1660288 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / В. И. Филимонов, Г. В. Коновалов. – Оpubл. 1.03.91. ДСП.
371. А. с. 1248690 СССР, МКИ В 21 D5/06. Способ изготовления листовых профилей с отбортовками / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. И. Колганов, В. И. Филимонов. – Оpubл. 27.09.86. Бюл. № 29.
372. А. с. 1300737 СССР, МКИ В 21 D5/06. Способ изготовления профилей из труднодеформируемых материалов / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. И. Колганов, В. И. Филимонов. – Оpubл. 1.12.86. ДСП.
373. Филимонов, В. И. Зависимость деформационных параметров подгибаемой кромки профиля от применяемого способа предотвращения волнистости ее кромки / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Научно технический калейдоскоп. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – № 1. – С. 53 – 58.
374. Берлет, Ю.Н. Проблема кромковой волнистости при профилировании в роликах / Ю.Н. Берлет, С.В. Филимонов. // Тезисы межвузовской конференции «Технико-экономические проблемы промышленного производства». – Набережные Челны: Изд-во Камского политехнического института. – 2000. – С. 147 – 148.
375. Берлет, Ю.Н. Деформационные характеристики подгибаемых полок и оптимизация углов подгибки при профилировании / Ю. Н. Берлет, В.И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Кузнечно – штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2002. – № 6. – С. 8 – 12.
376. Блейх, Ф. Устойчивость металлических конструкций. – М.: Физматгиз, 1959. – 544 с.
377. Потеря устойчивости и выпучивание конструкций / Под ред. Дж. Томсона и Дж. Ханта. – М.: Наука, 1991. – 424 с.
378. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова думка. –

1988. – 736 с.

379. Абанин, В.В. Интенсификация формообразования в роликах профилей с широким дном для сооружения военных объектов / В.В. Абанин, В.И. Филимонов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации технических систем: Сборник научных трудов. Вып. 3. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2003. – С. 79 – 92.
380. Пермяков, А.К. Формообразование гофропанелей из высокопрочных сталей и сплавов / А.К. Пермяков, С.Е. Сироткин. // Авиационная промышленность, 1988. – №1. – С.11.
381. Филимонов, В. И. О построении математической модели предварительного гофрообразования панелей под стесненный изгиб / В. И. Филимонов, З. Х. Мударисов // Авиационная промышленность. – 1991. – № 5. – С. 5 – 8.
382. Патент 2220802 РФ, МПК7 В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей с гофрами жесткости в донной части / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов. – Оpubл. 10.01.04. Бюл. № 1.
383. Марковцев, В.А. Количество переходов и критерий подобия при профилировании / В.А. Марковцев, С.В. Филимонов, М.В. Кокорин, В.И. Филимонов // Сборник трудов 5 Всероссийской научно–практической конф. «Современные технологии в машиностроении». – Пенза: ПДЗ, 2002. – Ч. 2. – С. 168 – 170.
384. Филимонов, В. И. Выбор параметров оценки технологичности профиля при его формообразовании в роликах / В. И. Филимонов, И. В. Селиваненко // Современные технологии в машиностроении: Труды 4 Всероссийской научно – практической конференции – Пенза: ПГУ, 2001. – С. 98 – 100.
385. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1972. – 440 с.
386. Филимонов, В. И. Об одном подходе к разработке специального правильного устройства / В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, В. А. Марковцев // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. «Авиационная технология». – 1989. – № 1. – С. 27 – 34.
387. Титов, Ю.А. Разработка металлосберегающих процессов штамповки деталей типа тел вращения вытяжкой – отбортовкой: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.05. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. — 178 с.
388. Пластичность и разрушение /Под ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Металлургия, 1977. – 236 с.
389. Филимонов, В. И. Кривизна поверхности и разрушение при стесненном изгибе / В. И. Филимонов // Сборник трудов отраслевого совещания МАП «Состояние и перспективы изготовления листовых профилей в изделиях отрасли». – М. : НИАТ, 1992. – С. 55 – 61.
390. Gronostajski, I.Z. et Dolny A. The influence of strain path on sheet metal forming limits / I.Z. Gronostajski, A. Dolny // Dev. Draw. Metals. —

London, 1983. - P. 83 – 86.

391. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор. – М.: Мир, 1985. – 231 с.
392. Исследование деформируемости авиационных материалов с учетом анизотропии при формообразовании стесненным изгибом: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Ю. М. Арышенский, Г. В. Проскуряков. – № ГР У34701. – М. : НИАТ, 1986. – 48 с.
393. Экспериментальное исследование процесса и разработка технологических рекомендаций по изготовлению профилей методом стесненного изгиба из сплава 01420, Д 16чТВ, В96: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин. – № ГР Ф27468. – М. : НИАТ, 1987. – 50 с.
394. Исследование, разработка и освоение оборудования и технологических процессов изготовления длинномерных профилей и деталей из перспективных алюминиевых сплавов: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин, В. А. Марковцев. – № ГР 035054. – М. : НИАТ, 1987. – 46 с.
395. Исследование, разработка проекта и внедрение оборудования и технологических процессов изготовления длинномерных профилей и профильных деталей из листов заготовок алюминиевых сплавов 1163, В95: Отчет о НИР / Руководители по направлениям Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов, А. С. Москвин, В. А. Марковцев, З. Х. Мударисов. – № ГР Ф36102. – М. : НИАТ, 1988. – 50 с.
396. Исследование влияния технологических параметров на деформируемость алюминиевых сплавов Д16, 1420 и композиционных материалов ВКА – 2 при формообразовании стесненным изгибом: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, Ю. М. Арышенский. – № ГР У44766. – М. : НИАТ, 1988. – 48 с.
397. Скрипачев, А.В. Исследование предельных возможностей формоизменения при стесненном изгибе / А.В. Скрипачев // Сборник трудов: Машины и процессы обработки материалов давлением. – Тула: Изд-во ТПИ, 1988. – С. 154 – 158.
398. Авиационные материалы / Справочник т. 4, ч. 1, кн. 2. – М.: ОНТН, 1983. – 520 с.
399. Проскуряков, Г.В. Исследование возможности формообразования профилей из сплава АБМ1 стесненным изгибом / Г.В. Проскуряков, Е.А. Мамонтов, Д.А. Решетников, и др. / Авиационная промышленность, 1984. – № 2. – С. 39 – 40.
400. Филимонов, В.И. Об учете влияния дисперсных частиц на деформируемость двухфазных композитов при формообразовании стесненным изгибом / В. И. Филимонов, Б. В. Богданов, Г. В. Проскуряков и др. // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. «Авиационная технология». – 1989. – № 1. – С. 9 – 13.
401. Волков, С.Д. Статическая механика композитных материалов / С.Д.

Волков, В.П. Ставров. – Минск: Издательство БГУ, 1978. – 206 с.

402. Введение в микромеханику / Под. Ред. М. Онами; Пер. с японского. – М.: Металлургия, 1987. – 280 с.
403. А. С. 1741950 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ гибки профилей из листовых малопластичных материалов и устройство для его осуществления / А. Г. Проскуряков, В. И. Филимонов. – Оpubл. 22.02.92
404. А. С. 1503165 СССР, МКИ В 21 D5/06. Устройство для гибки / А. Г. Проскуряков, В. И. Филимонов, А. С. Москвин. – Оpubл. 10.08.87. ДСП.
405. Сенаторова О.Г. Особенности структуры гнутых профилей из сплава В95пчАТ2 / О.Г. Сенаторова, Т.А. Курдюкова, В.С. Сандлер и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1992. - № 7. – С. 33 – 35.
406. Лейченко М.А. Производство и применение гнутых профилей / М.А. Лейченко // Рационализация профилей проката. Под ред. А.И. Целикова. – М.: Профиздат, 1956. – С. 189 – 203.
407. А. С. 1780897 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ гибки профилей / Т.В. Перязева, А. С. Москвин, Т.В. Янкевич. – Оpubл. 15.12.92. Бюл. № 46.
408. Исследование процессов и разработка РТМ по изготовлению профилей стесненным изгибом из алюминиевых сплавов Д16, 1163, В95, 1420: Отчет о НИР / Руководители А. С. Москвин, В. И. Филимонов. – № ГР ЦТ9340030. – М. : НИАТ, 1990. – 50 с.
409. А. с. 1820547 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых уголкового профиля / В. И. Филимонов, А. С. Москвин, В. А. Марковцев. – Оpubл. 12.10.92. ДСП.
410. ТР 1.2.1910 – 88. Изготовление деталей из профилей гнутых методом стесненного изгиба из плакированных листовых материалов Д16, 1163, В96пч / Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин В. И. Филимонов и др. – М.: ВИАМ, 1988. – 42 с.
411. ММ 1.4.1951 – 89. Проектирование и изготовление формующего инструмента для изготовления профилей из листа методом стесненного изгиба / В. И. Филимонов, А. С. Москвин, Б. В. Богданов, И. М. Колганов. – М. : НИАТ, 1989. – 48 с.
412. Филимонов, В. И. Определение размеров зон деформирования при профилировании / В. И. Филимонов // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Математическое моделирование в машиностроении». – Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1990. – С. 48.
413. Филимонов, С.В. Исследование технологических возможностей гибочно–прокатного станка ГПС–300 /С.В. Филимонов, В.И. Филимонов // Внутривузовская научно–техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск: УлГТУ, 1999. – С. 37–38.

414. Филимонов, В.И. Концепция исследования предельных возможностей процесса профилирования /В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Ресурсосберегающие технологии листовой и объемной штамповки. Всероссийская научно–техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск: УГТУ, 1997. – С. 69 – 70.
415. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 184 с.
416. Марковцев, В.А. Экспериментальный пресс "ПИГПЛУ–1" для испытания гнутых профилей на локальную потерю устойчивости /В.А. Марковцев, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов и др. // Современные технологии в машиностроении. V Всероссийская научно–практическая конференция. Сборник материалов. – Пенза: ПДЗ, 2002. С. 36–38.
417. Патент 35087 РФ, МПК7 В 21 D 43/00. Пресс для испытания гнутых профилей на локальную устойчивость / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов, М. В. Илюшкин. – Оpubл. 27.12.03, Бюл. № 36.
418. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: ГНТИМЛ. – 1963. – 232 с.
419. Макарова, Н.В. Статистика в Excel / Н.В. Макарова, В.Я. Трофимец. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
420. Филимонов, В.И. Особенности изготовления в роликах перфорированных уголкового профиля / В.И. Филимонов, И.Н. Гудков, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Производство проката. – 2004. – № 12 . – С. 29 – 34.
421. Филимонов, В.И. Особенности технологии производства в роликах полузакрытых профилей с элементами жесткости / В.И.Филимонов, М.В. Илюшкин, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – № 11. – С. 12 – 17.
422. Филимонов, В.И. Технология производства бамперов автомобиля ВАЗ-2108 и автоматизированная линия для ее реализации / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 11. – С. 14 –19.
423. Филимонов, В. И. Применение осевого подпора при формообразовании профилей из листа гибкой – волочением в условиях стесненного изгиба / В. И. Филимонов, Ф. З. Абдулин, И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков // Авиационная промышленность. – 1984. – № 8. – С. 46 – 48.
424. Jetteur, P. Largeur effective d'une tole courbe comprimee / P. Jetteur, R. Maquoi // Construction metallique, 1984. – №2. – p. 51-57.

425. Филимонов, В. И. Силовые параметры при стесненном изгибе и проектирование профилегибочного оборудования / В. И. Филимонов, А. С. Москвин // *Авиационная промышленность*. – 1994. – № 9 – 10. – С. 5 – 10.
426. Абанин, В.В. Моделирование контактного взаимодействия «инструмент – заготовка» при производстве в роликах гнутых профилей для автомобилестроения / В. В. Абанин, В. И. Филимонов, М. В. Илюшкин и др. // *Сборник трудов 3 международной конференции «Автомобиль и техносфера»*. – Казань, июнь 2003. – С. 148 – 153.
427. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ.. Под ред. В.В. Гольдштейна. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
428. Патент 37221 РФ, МПК7 G 01 N 19/04. Устройство для испытания покрытия на отслоение / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов, А. В. Филимонов. – Опубл. 10.04.04, Бюл. № 10.
429. Филимонов, В. И. Изготовление С – образных профилей с рифтами в донной части / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов, П. Н. Куприн // *Современные технологии в машиностроении: Труды 5 Всероссийской научно – практической конференции*. Ч. 1– Пенза : ПГУ, 2002. – С. 41 – 44.
430. Филимонов, В. И. Схема предотвращения волнистости кромки при формообразовании широкоплечного профиля в роликах / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, В. А. Марковцев // *Современные технологии в машиностроении: Труды Всероссийской научно – практической конференции* – Пенза: ПГУ, 2001. – С. 93 – 95.
431. Березовский, С. Ф. Эксплуатация и ремонт оборудования профилегибочных станков / С. Ф. Березовский. – Челябинск: Металлургия. Челяб. отд-ние, 1991. – 175 с.
432. Мударисов, З.Х. Профилегибочные станки семейства ГПС / З.Х. Мударисов // *Тезисы докладов семинара «Оборудование, технология и организация цехов по производству профильной продукции и ТНП»*. – Пенза: ПДЗ, 1991. – С. 5 – 6.
433. Марковцев, В.А. Выбор конструктивных параметров правильного устройства / В.А. Марковцев, Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов. // *Авиационная промышленность*. – 1988. – № 9. – С. 32 – 35.
434. Биргер, И.А. Соппротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
435. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 704 с. (В 1993 г. вышло 4-е издание)
436. Станок формообразования профилей СФПЭ-1 / В.И. Филимонов, А.А. Сеппар // *Инф. листок Ульяновского ЦНТИ*, № 306–91. – Ульяновск: ЦНТИ, 1991. – 2 с.

437. Патент 2028847 Россия, МКП7 В 21 D 5/06. Профилегибочный станок / З. Х. Мударисов, В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, А. Г. Проскуряков. – Оpubл. 20.05.95. Бюл. № 5.
438. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
439. Прохоренко, И.Ф. Унифицированные пружины растяжения и других типов / И.Ф. Прохоренко, Н.П. Панченко, Е.К. Решетников. – М.: Металлургия, 1985. – 694 с.
440. Санкин, Ю.Н. Устойчивость холодной прокатки / Ю. Н. Санкин, В. И. Филимонов, В. А. Марковцев // Сборник «Научно – технический прогресс и инженерное образование». – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 1990. – С. 20 – 22.
441. Санкин, Ю.Н. Об устойчивости процесса формообразования профилей, совмещенного с правкой / Ю. Н. Санкин, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Сборник трудов отраслевого совещания МАП «Состояние и перспективы изготовления листовых профилей в изделиях отрасли». – М.: НИАТ, 1992. – С. 50 – 55.
442. Филимонов, В. И. Оборудование для реализации технологии стесненного изгиба / В. И. Филимонов // Тезисы семинара «Технологические проблемы производства летательных аппаратов и двигателей». – Казань, 1993. – С. 76.
443. Станок гибочно-прокатный модели ГПС-200М1 / В.А. Марковцев, А.С. Москвин, З.Х. Мударисов, В.И. Филимонов, // Информационный листок Ульяновского ЦНТИ, № 314 – 89. – Ульяновск: ЦНТИ, 1989. – 4 с.
444. Литвинов, А.В. Изготовление методом стесненного изгиба листовых панелей с элементами жесткости двойной толщины / А.В. Литвинов, В.Н. Антонов // Сборник трудов отраслевого совещания МАП «Состояние и перспективы изготовления листовых профилей в изделиях отрасли». – М.: НИАТ, 1992. – С. 85 – 90.
445. Патент 2008114 Россия, МКП⁷ В 21 D 5/06. Профилирующий станок / В. Н. Антонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов и др. – Оpubл. 28.02.94. Бюл. № 4.
446. Шипунов, В.Н. Оборудование для изготовления гофрированных панелей / В. Н. Шипунов, В. И. Филимонов // Тезисы докладов семинара «Оборудование, технология и организация цехов по производству профильной продукции и ТНП». – Пенза: ПДНТП, 1991. – С. 7 – 8.
447. Филимонов, В. И. Стесненный изгиб – альтернатива холодной штамповке / В. И. Филимонов // Тезисы докладов семинара «Новые материалы, технология, автоматизация в холодноштамповочном производстве». – Пенза : ПДНТП, 1991. – С. 19 – 20.

448. Разматыватель рулона / А.П. Матвиенко, В.А.Марковцев, З.Х. Мударисов, В.И. Филимонов // Информационный листок Ульяновского ЦНТИ № 143–91. – Ульяновск: ЦНТИ, 1991. – 2 с.
449. Станок прокатки гофров СПГ-1 / В.Н. Шипунов, В.И. Филимонов, З.Х. Мударисов и др. // Информационный листок Ульяновского ЦНТИ, № 129-91. – Ульяновск: ЦНТИ, 1991. – 3 с.
450. Ножницы летучие (НЛ-1) / В.Н. Шипунов, В.А.Марковцев, З.Х. Мударисов, В.И. Филимонов // Информационный листок Ульяновского ЦНТИ, № 141–91. – Ульяновск: ЦНТИ, 1991. – 4 с.
451. А. С. 1731346 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гофрированных профилей / А. В. Литвинов, В. И. Филимонов. – Оpubл. 07.05.92. Бюл. № 17.
452. Абанин, В.В. Технология интенсивного деформирования и применение профилей высокой жесткости и точности в конструкциях боевой техники /В.В. Абанин, В.И. Филимонов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации технических систем: Сборник научных трудов. Вып. 3. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2003. – С. 72 – 79.
453. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Под ред. Ю.Д. Амирова. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.
454. Патент 2228232 РФ, МПК7 В 21 D 5/06. Способ изготовления широкополочных швеллерных и корытных симметричных тонкостенных профилей в роликах / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов. – Оpubл. 10.05.04, Бюл. № 13.
455. Патент 2222402 РФ, МПК7 В 21 D 5/06. Способ изготовления симметричных профилей / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, И. М. Колганов, П. Н. Куприн. – Оpubл. 27.01.04, Бюл. № 3.
456. Заявка на изобретение № 2004103765/02 от 9.02.04. МПК7 В 21 D 5/06. Способ изготовления швеллеров преимущественно с покрытием / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, М.В. Илюшкин.
457. Патент 2201829 РФ, В 21 D 5/06. Способ изготовления корытного профиля / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, В. А. Марковцев. – Оpubл. 10.04.03. Бюл. № 10.
458. Абанин, В.В. Технологические особенности мелкосерийного производства гнутых профилей для автомобилестроения / В. В. Абанин, В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Сборник трудов 3 международной конференции «Автомобиль и техносфера». Казань, 17-18 июня, 2003. – Казань: Изд-во КГТУ, 2003. – С. 141 – 147.
459. Марковцев В.А., Филимонов В.И., Филимонов С.В. О соотношении силовых параметров при профилировании полосы / / Механика и

- процессы управления. Сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – С. 50 – 55.
460. Филимонов, С.В. Влияние схем формообразования на параметры точности гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов, М.В. Илюшкин // XXXIV Научно–техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск: УГТУ, 2000. – С. 44 – 45.
 461. Ильюшин, А.А. Механика сплошной среды /А.А. Ильюшин. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 310 с.
 462. Филимонов, В.И. Условия замыкания калибров при интенсивном формообразовании открытых профилей в роликах / В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Производство проката. – 2004. – № 11. – С. 23 – 29.
 463. Заявка на изобретение № 2004111825/02 от 19.04.04. МПК7 В 21 D 5/06. Торцовая проводка клетки профилегибочного стана / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, М.В. Илюшкин.
 464. АС СССР № 1077680, кл. В21D5/06. Валок рабочей клетки профилегибочного стана /И.С. Тришевский, М.Е. Докторов, Н.В. Пшеничная и др.– Оpubл. 07.03.84. – Бюл. № 9.
 465. Технологический процесс получения профилей методом стесненного изгиба / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, А.С. Москвин, З.Х. Мударисов // Информационный листок Ульяновского ЦНТИ, № 18 – 89. – Ульяновск: ЦНТИ, 1989. – 4 с.
 466. Создание и внедрение поточно – групповой линии производства длинномерных листовых профилей и деталей из них изделия «114» : Отчет о НИР / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, В. И. Лапшин и др. – № ГР ЦТ9345633. – М.: НИАТ, 1990. – 72 с.
 467. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2-х томах. Т. 1 / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с.
 468. Филимонов, В.И. О некоторых особенностях выполнения подсечек на профилях, изготовленных из листа / В.И. Филимонов, Э.М. Каримов, Г.В. Проскуряков // Авиационная промышленность, 1989. – № 7. – С. 5 – 8.
 469. Филимонов, В.И. Определение силовых характеристик при подсечке профилей из листа / В.И. Филимонов, Г.В. Проскуряков, Г.В. Коновалов // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. «Авиационная технология», 1990. – № 1(14). С. 10 – 23.
 470. Филимонов, В. И. Выполнение односторонних подсечек на профилях из листа / В. И. Филимонов, Г. В. Коновалов // Сборник трудов отраслевого совещания МАП «Состояние и перспективы изготовления листовых профилей в изделиях отрасли». – М.: НИАТ, 1992. – С. 61 – 64.
 471. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / Под общей редакцией Л.И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.
 472. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х томах. Т. 1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. –

656 с.

- 473. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х томах. Т. 1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
- 474. Филимонов, В. И. Гнутые профили – в современное производство / В. И. Филимонов // Научно-технические технологии товаров народного потребления: Тезисы научно – практической конференции. – Ульяновск, 18 – 21 февраля, 1997. – С. 37 – 38.