

*Ульяновский государственный
технический университет*

НПО «ИДМ»

А.В. Филимонов, С.В. Филимонов

Изготовление полузакрытых гнутых профилей в роликах методом интенсивного деформирования

**Ульяновск
2010**

УДК 621.7

ББК 22.251

Ф83

Рецензенты:

Зам. директора УНТЦ ВИАМ, д-р техн. наук, профессор Постнов В.И.,
Технический директор ООО «Спецтехнология» Лапшин В.И.

Одобрено редакционно-издательским советом университета

Филимонов А.В., Филимонов С.В.

Изготовление полузакрытых гнутых профилей в роликах методом интенсивного деформирования / А.В. Филимонов, С.В. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010. – 204 с.; илл. 157, табл. 45.

ISBN 5 – 89146 –

Книга, написанная кандидатами технических наук, имеющими многолетний опыт разработки и внедрения оборудования и технологий на основе метода интенсивного деформирования, предназначена для разработчиков технологий изготовления гнутых профилей в роликах, а также аспирантов специальности 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением». Книга также может оказаться полезной технологам и конструкторам, работающим в области профилирования и создания профилировочного и профилигибочного оборудования.

Работа подготовлена на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ и в НПО «ИДМ» (г. Ульяновск).

УДК 621.7

ББК 22.251

Научное издание

ФИЛИМОНОВ Андрей Вячеславович, ФИЛИМОНОВ Сергей Вячеславович

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛУЗАКРЫТЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ В РОЛИКАХ
МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Редакторы **О.С. Бычкова, О.А. Семенова**
Технический редактор В.Н. Кокорин

Подписано в печать **30. 02. 2010**. 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, А.В., Филимонов, С. В., 2010

© Оформление. УлГТУ, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЯХ И ОС- НОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА	7
1.1. Применение полужакрытых профилей.....	7
1.2. Альтернативные технологии производства полужакрытых профилей ...	15
1.3. Методы изготовления гнутых профилей в роликах.....	19
1.4. Профилировочное оборудование.....	29
1.5. Материалы, применяемые для производства гнутых профилей.....	35
1.6. Дефекты полужакрытых профилей и требования к их качеству.....	37
1.7. Анализ процессов формообразования полужакрытых профилей	44
1.8. Теоретический анализ процессов профилирования.....	51
Выводы.....	55
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМООБ- РАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ В РОЛИКАХ.....	58
2.1. Классификация полужакрытых профилей	58
2.2. НДС в зонах изгиба при различном нагружении и ширина заготовки....	62
2.3. Формовка рифтов и число переходов при формообразовании полужа- крытого профиля.....	81
2.4. Зона плавного перехода и режимы подгибки элементов профиля.....	90
2.5. Устойчивость формообразования полужакрытых профилей.....	100
Выводы.....	105
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМООБРАЗО- ВАНИЯ ПОЛУЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЕЙ	107
3.1. Исследуемые профили, оснащение и методы исследования.....	107
3.2. Исследование угловых зон и ширина заготовки.....	111
3.3. Влияние наличия рифтов и гофр на процесс формообразования.....	126
3.4. Исследование поведения заготовки в межклетьевом пространстве.....	134
3.5. Исследование потери устойчивости при профилировании.....	146
Выводы.....	149

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО.....	151
4.1. Новый алгоритм разработки технологии производства полузакрытых профилей.....	151
4.2. Расположение профиля в формующих валках.....	156
4.3. Выбор базового элемента и оси профилирования.....	161
4.4. Разработка схемы формообразования.....	162
4.5. Обеспечение размерной точности полузакрытых профилей.....	163
4.6. Уточнение числа переходов и выбор оборудования.....	164
4.7. Особенности формовки периферийных ЭДТ.....	169
4.8. Проектирование и изготовление технологического оснащения.....	170
4.9. Отработка технологии производства полузакрытых профилей.....	176
4.10. Внедрение оборудования и технологии.....	178
Выводы.....	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	187
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	189

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление полузакрытых гнутых профилей в роликах профилировочных станков обладает определенными преимуществами перед процессами прессования, гибки в штампах, кромкогибочных машинах, среди которых относительно высокая производительность, безотходность, возможность получения длинномерных многоэлементных деталей из заготовок с покрытием и т.д.

В условиях меняющейся конъюнктуры и постоянного совершенствования конструкций профилей традиционное профилирование не является эффективным в связи с его ориентацией на серийный характер производства (из-за громоздкого оборудования, большого количества оснастки, больших временных потерь на переналадку). Например, крупногабаритное оборудование и, соответственно, большое количество технологического оснащения, снижающее мобильность производства и требующее значительного первоначального капитала, сдерживает инвестиции небольших компаний в эту сферу.

В настоящее время наиболее перспективным направлением изготовления гнутых профилей является профилирование методом интенсивного деформирования (МИД). Технология МИД широко востребована отечественным промышленным рынком. Разработчики технологии МИД в г. Ульяновске ежегодно поставляют на рынок до 40 автоматических линий и до 200 технологий производства профилей типовой номенклатуры (и до 40 технологий производства полузакрытых профилей).

Однако применение данного метода для производства полузакрытых профилей ограничивается вследствие ряда факторов: отсутствие классификации полузакрытых профилей и их дефектов, надежных математических моделей процесса формообразования, рекомендаций по проектированию схем формообразования и технологической оснастки, недостаточная эффективность технических решений по предотвращению дефектов и повышению качества профилей, отсутствие классификации профилировочного оборудования и рекомендаций по его применению и др. Указанные недостатки сдерживают широкое внедрение МИД в те отрасли народного хозяйства, где высока потребность в гнутых полузакрытых профилях. Существовавшие ранее подходы к производству полузакрытых профилей основывались на методе проб и ошибок в проектировании схем формообразования, что требовало значительных затрат на отработку технологии и/или реализацию технических решений, связанных с повышением качества производимых профилей. В этой связи, выработка технических и технологических решений, направленных на снижение затрат и повышение качества полузакрытых профилей, изготавливаемых в роликах МИД, на основе теоретических и экспериментальных исследований является актуальной научной и производственной задачей.

Целью исследований, отраженных в данной книге, являлось снижение затрат на разработку и освоение технологии и повышение качества полузакрытых профилей. Предметом исследования было совершенствование технологии производства МИД в роликах тонкостенных полузакрытых профилей из стальных заготовок с цинковым или комбинированным покрытием, а также профилировочного и вспомогательного оборудования.

В результате исследований получен ряд новых результатов, в частности, разработаны классификаторы полузакрытых профилей, их дефектов и профилировочного оборудования, а также математические модели угловой зоны, формовки рифтов в донной части, протяженности зоны плавного перехода, устойчивости формообразования профиля. Технические решения по совершенствованию основного и вспомогательного оборудования защищены патентами.

Результаты работы прошли практическое апробирование и внедрены в четырех отраслях промышленности. Новые процедуры проектирования роликовой оснастки для изготовления МИД гнутых полузакрытых профилей позволяют сократить затраты на освоение технологии и повысить качество производимых профилей.

По результатам исследований, отраженным в данной книге, опубликовано более 40 печатных работ, в том числе 8 патентов и более 10 статей в рецензируемых журналах.

Работа состоит из четырех разделов. В первом разделе рассмотрены вопросы применения полузакрытых профилей в различных отраслях, проведен технико-экономический анализ различных способов изготовления полузакрытых профилей, рассмотрено применяемое оборудование и используемые материалы. Здесь же проанализированы дефекты полузакрытых профилей, а также экспериментально-технологические и теоретические работы других авторов, тесно примыкающие к рассматриваемой тематике. Второй раздел посвящен разработке математических моделей процессов формообразования полузакрытых профилей. В третьем разделе дано описание экспериментальных исследований для верификации разработанных математических моделей. Четвертый раздел описывает новую проектную процедуру создания технологии производства полузакрытых профилей с использованием результатов проведенных исследований. Здесь же рассматриваются вопросы совершенствования оборудования и внедрения результатов выполненной работы.

Исследования выполнены в Ульяновском государственном техническом университете на кафедре «Материаловедение и ОМД» и в НПО «ИДМ» (г. Ульяновск).

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЯХ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Применение полузакрытых профилей

Полузакрытые гнутые профили подразделяют на силовые, ограждающие и декоративные. Их применение определяется функциональным назначением и конструктивными особенностями сечения конкретного типоразмера [1].

На отечественный рынок профильной продукции ежегодно приходят десятки новых типоразмеров полузакрытых профилей, изготавливаемых из различных материалов. Основным методом изготовления таких профилей является многопереходная технология традиционного профилирования отечественной [2] и зарубежной разработки [3]. На рис. 1.1. представлена схема, отражающая применение полузакрытых профилей в различных отраслях промышленности.

В промышленном и гражданском строительстве в последнее десятилетие использование полузакрытых профилей приобретает широкий размах; они применяются в конструкциях заборов, перегородок, сборных панелей, подпорок стен, подвесных потолков и т.п. (см. рис. 1.1) [4]. Номенклатура полузакрытых стальных профилей, выпускаемых после 2002 года, базируется на 28 технических условиях [5], разработанных предприятиями созданной в 2002 году Национальной ассоциации производителей стальных гнутых профилей. Некоторые виды полузакрытых профилей, производимых этими предприятиями, приведено ниже. Фирма «Маяк» (г. Самара) изготавливает специальные профили полузакрытого типа, сайдинг, подвесные реечные потолки (рис. 1.2).

В группе предприятий «Стройпромет» (г. Сходня М.О.) на станках фирмы «KNUDSON» производятся сайдинги семи видов из стали толщиной 0,5 мм и шириной от 216 до 502 мм, а также водосточные желоба, стеновые панели, софиты (рис. 1.3) с толщиной стенок от 0,8 до 1,2 мм по согласованным ТУ [6].

Профили для фахверка и перегородок производит ООО «ЛМЗ-металлоцентр» (г. Лысьва Пермской обл.) по техническим условиям [7, 8] с продольными элементами жесткости (рис. 1.4). Толщина стенок профилей – от 0,55 до 0,7 мм, высота – до 50 мм.

ОАО «Челябинский завод профилированного стального настила» выпускает профилированные листы повышенной жесткости по согласованным ТУ, а также профили для арочных покрытий и настилов покрытий и стен (рис. 1.5), согласно [9, 10], размером до 330x136 мм и толщиной стенок от 0,8 до 1,2 мм.



Рис. 1.1. Применение полужакрытых профилей

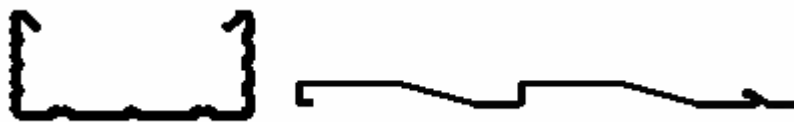


Рис. 1.2. Профили компании «Маяк»: потолочный профиль и сайдинг

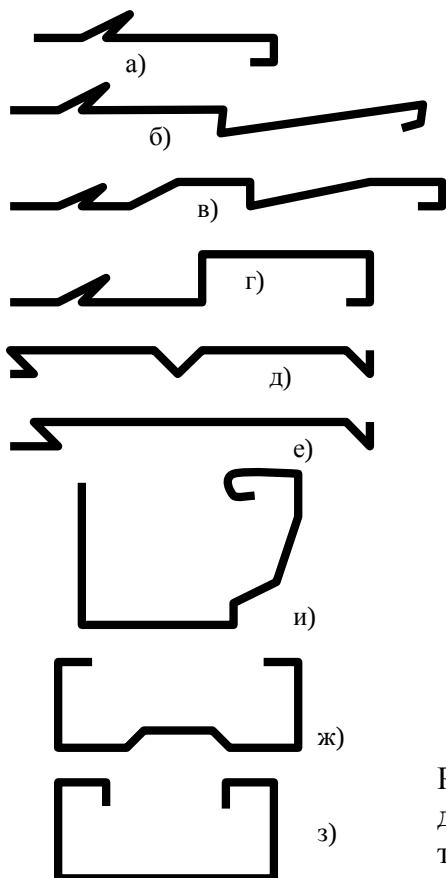


Рис. 1.3. Профили «Стройпромет»: а-г – сайдинги; д – софит; е – стеновая панель; и – водосточный желоб; ж, з – профили несущего каркаса панелей

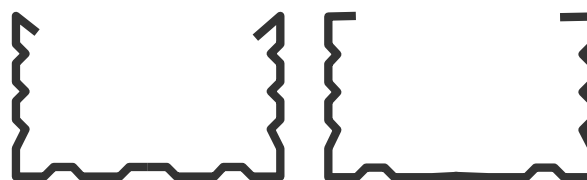


Рис. 1.4. Полузакрытые профили повышенной жесткости ООО «ЛМЗ-Металлоцентр»

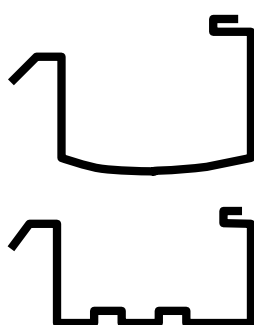


Рис. 1.5. Профили для арочных покрытий и настилов



Рис. 1.6. Полузакрытые строительные профили компании «ИПРИС»

Достаточно широкую номенклатуру полузакрытых строительных профилей (профи-

лей для оконных рам, металлических дверей, облицовочных панелей – рис. 1.6) производит производственная фирма «ИПРИС» (Украина, г. Харьков) [11].

ЗАО «АЛАР-2» (г. Москва) изготавливает профили толщиной 0,6 – 2,0 мм С-образного и Σ -образного сечений высотой до 50 мм и шириной до 250 мм по согласованным ТУ [12]. Аналогичную номенклатуру профилей выпускают ООО «ИНГУС» (г. Ижевск) по ТУ [13] и ООО «ВЕНТАЛЛ» (г. Обнинск) по ТУ [14], причем, номенклатура профилей последнего предприятия составляет по С-

образным профилям – 33 типоразмера, по профилям повышенной жесткости – 26 типоразмеров.

Номенклатура профилей ЗАО «Аркада» (г. Смоленск) является наиболее разнообразной и включает стоечные, декоративные, армирующие, дверные профили и ряд других (рис. 1.7), исполняемых в соответствии с ТУ [15].

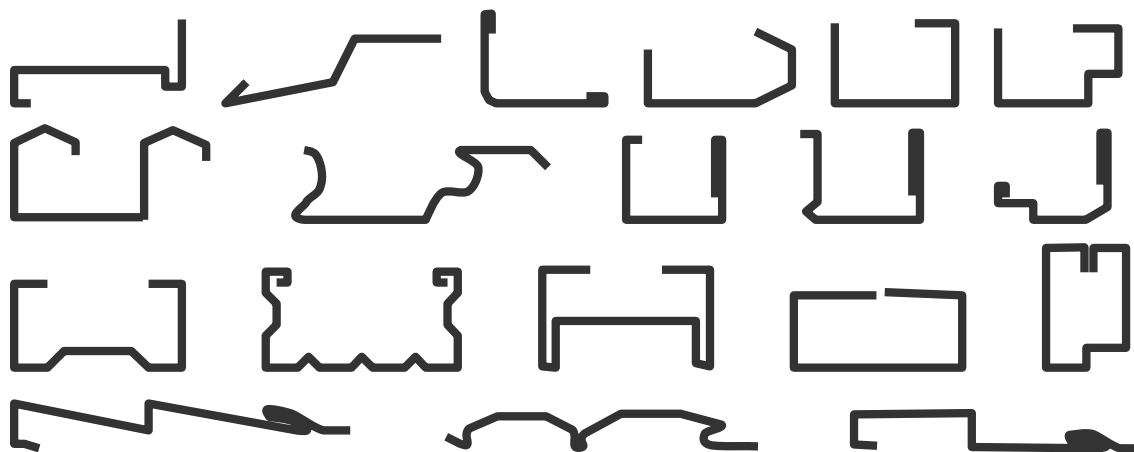


Рис. 1.7. Полузакрытые профили, производимые ЗАО «Аркада»

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. 1.8) в соответствии с утвержденными ТУ[16].

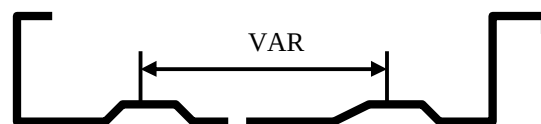


Рис. 1.8. Профили кровли компании «Стальинвест»



Рис. 1.9. Металлочерепица и полузакрытые профили ОАО «Ульяновский НИАТ»

ОАО «Ульяновский НИАТ» освоило ряд типоразмеров профилей полузамкнутых сечений для строительства: несущие элементы каркасных строений, кровельные детали, декоратив-

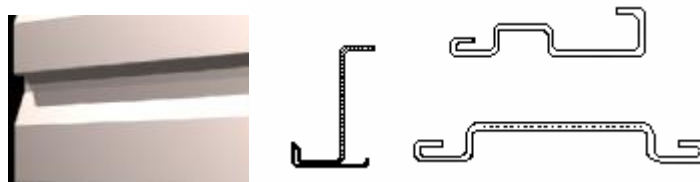


Рис. 1.10. Применение полузакрытых профилей для отделки и облицовки помещений

ные элементы отделки интерьера помещений (рис. 1.9), водостоки, панели облицовки зданий [17, 4].

Разработкой технологии производства полузакрытых профилей для облицовки зданий, производства стальных дверей, отделки стен и потолков (рис. 1.10) занимаются ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ» (г. Ульяновск) [18].

Можно указать другие предприятия, производящие большое количество полузакрытых профилей для строительства (коньков крыш, подоконников, дождевых стоков, соединительных элементов, деталей герметизации, снегозащиты и т.п.) [19]. Среди них – промышленная компания «Металл Профиль» (г. Москва), фирма «Московский центр кровли», ООО «Караджа-Ро» (г. Москва, дилер фирмы «Lindab AB»), компания «Roof Expert» (г. Москва, дилер одноименной шведской фирмы), фирма «Руф Интер» (г. Москва, дилер шведской фирмы KAMI), ООО «Евролайн Вест» (г. Санкт-Петербург, дилер фирмы Weckman), ЗАО «Ranilla Taldom» (г. Москва, дилер одноименной финской фирмы).

В автомобильной промышленности применение гнутых профилей является значительным [19, 20, 21]: 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 т.п. (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Профили для автомобилестроения: а – молдинг; б – стеклоподъемник; в – элемент жесткости кузова; г – несущий элемент навесного багажника

В легковых автомобилях отечественного производства находят применение десятки типоразмеров гнутых профилей («Жигули» – около 20 типоразмеров, «УАЗ» – около 30 типоразмеров) [22]. В последние годы все чаще применяются высокотехнологичные материалы с покрытием для производства полузакрытых профилей для отделки узлов автомобиля [4].

В ОАО "Ульяновский НИАТ" и ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск) освоены десятки технологий производства полузакрытых профилей: труб, профилей для порогов, молдингов, съемных багажников, стеклоподъемников, окантовок для автомобилестроения [17, 19]. С – образные профили с толщиной стенки от 1,5 до 2,0 мм (табл. 1.1) для стеклоподъемников автомобиля УАЗ из-

готовавливаются на автоматизированной линии «Ульяновский НИАТ» [21]. За последние годы созданы технологии производства бамперов для автомобилей семейства ВАЗ, ряда других деталей [23, 19].

Таблица 1.1

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

Детали из гнутых профилей используются в конструкциях автобусов ПАЗ, автоприцепов, специальных автомобилей, лестниц пожарных машин и т.д.

По оценке работы [19], необходимый сортамент профилей для отрасли автомобилестроения — более 500 профилеразмеров; из них 80 % — полузакрытые профили, которые могут быть получены профилированием, обеспечивающим высокую точность деталей.

В отечественном авиастроении гнутые профили из плакированного алюминия листа пришли на смену прессованным профилям, применявшимся в качестве стрингеров, в связи с необходимостью увеличения ресурса планера с 20 – 30 тыс. часов до 50 – 60 тыс. часов [24]. Листовые профили с малыми радиусамигиба и утолщением в угловых зонах, изготавливаемые стесненным изгибом, имеют ряд преимуществ перед прессованными профилями [24]: более высокую коррозионную стойкость (в 1,5...2,5 раза выше, чем у прессованных); высокую прочность за счет деформационного упрочнения и исходных свойств листового металла (на (10 – 15)% выше чем у прессованных профилей); стабильность механических свойств по длине профиля; высокую точность размеров поперечного сечения; невысокую стоимость изготовления.

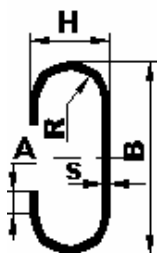
За последние 20 лет гнутые профили, изготавливаемые стесненным изгибом (рис. 1.12), внедрены на шесть типов самолетов [24]: Ил-103, Ил-114 [17], Бе-200, Ту-334, Ан-70, Ан-140 [4].

Однако из 200 типоразмеров авиационных листовых профилей только пять являются полузакрытыми. Большей частью применяют гнутые профили Z-образного сечений с толщиной стенки от 0,8 до 1,5 мм (37 типоразмеров).



Рис. 1.12. Профили из алюминиевых сплавов, изготовленные методом стесненного изгиба в ОАО «Ульяновский НИАТ»

Зарубежные компании («Боинг», «МакКоннел Дуглас» и др.) применяют полузакрытые профили С-образного типа (рис. 1.13), однако их объем не превышает 4 % всех гнутых профилей, применяемых в конструкциях самолетов.



Элементы профиля и их размеры				
В, мм	Н, мм	А, мм	Р, мм	с, мм
8-35	10-22	1-13	4-11	0,5-1,3

Рис. 1.13. С-образные профили, применяемые в самолетах иностранных фирм

Отсюда видно, что сектор авиастроения предоставляет весьма небольшие возможности для внедрения полузакрытых профилей.

В машиностроении спрос на гнутые, преимущественно перфорированные профили [25, 26], вызван развитием каркасного строительства (рис. 1.14) и оснащения складских помещений (рис. 1.15), чему также способствовало развитие торговли и малого бизнеса в последние годы.

Преимущества стеллажей из перфорированных полузакрытых профилей [19] заключаются в высокой прочности и жесткости получаемых конструкций; возможности изменения конфигурации стеллажей при неустойчивой номенклатуре хранимых грузов; легкости монтажа и демонтажа; невысокой стоимости их изготовления.

Кроме того, получила широкое распространение система универсально-сборных приспособлений (УСП), в которой из холодногнутых перфорированных профилей собирают приспособления и организационную оснастку для ме-



Рис. 1.14. Монтаж каркаса из полузакрытых профилей

ханической обработки, сварки, сборки, контроля деталей и узлов. После изготовления нескольких партий деталей эти приспособления разбирают, а их детали и узлы используют для компоновки других приспособлений [1]. Номенклатура полузакрытых профилей для машиностроения и складского хозяйства насчитывает до сотни типоразмеров [27].



Рис. 1.15. Сборно-разборный стеллаж

В электротехнической промышленности применяют уголковые, 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 [27].

В сельскохозяйственном и тракторном машиностроении специальные гнутые профили, преимущественно полузакрытые, находят применение в конструкциях рам и кабин тракторов, прицепных и самоходных комбайнах, жатках, культиваторах, сеялках, стогометателях, зерноочистительных и картофелеуборочных машинах, машинах для животноводческих ферм, тракторных прицепах различной грузоподъемности и назначения, а также в силосоуборочных комбайнах, кормораздатчиках, разбрасывателях, погрузчиках [1, 19]. Перфорированные полузакрытые профили используют для строительства складов-ангаров, ремонтно-технических станций в сельских районах. В последние годы полузакрытые профили различных типов применяют в тепличном хозяйстве сельских районов (рис. 1.16) [19], их номенклатура насчитывает десятки типоразмеров.



Рис. 1.16. Каркасная теплица из профилей

В производстве мебели последнего десятилетия широкое применение нашли полузакрытые тонкостенные профили из материалов с покрытием [4].



Рис. 1.17. Полузакрытые и замкнутые профили, используемые при производстве мебели

Широко известны мебель и торговое оборудование для современных торговых

комплексов и супермаркетов шведских, китайских, немецких и французских компаний [4]. Российские производители мебели все чаще применяют полузакрытые профили (рис. 1.17) в качестве несущих, функциональных или декоративных элементов в комбинации с деревом для производства столов, кроватей, шкафов-купе. Процент указанных профилей в номенклатуре НПО «ИДМ», г. Ульяновск (разработчик технологии) составил в 2007 году 14% от всей номенклатуры профилей в портфеле заказов.

Эффективность применения полузакрытых профилей (рис. 1.18) достигается за счет конструктивных преимуществ последних, экономии материала и снижении затрат производства, сборки и пр. [1, 2]. Оценка эффективности выполнена с учетом альтернативы применения фасонных прессованных или сортовых профилей.

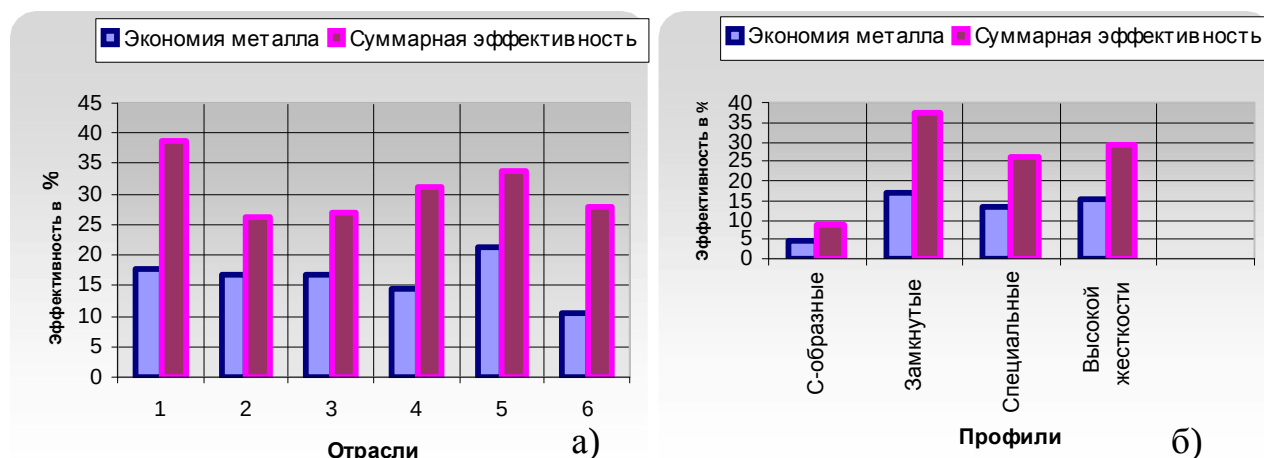


Рис. 1.18. Эффективность применения полузакрытых профилей в расчете на стоимость 1 т материала: а) – в отраслях: 1 – строительство; 2 – автомобилестроение; 3 – машиностроение; 4 – сельское хозяйство и тракторостроение; 5 – производство мебели; 6 – прочие отрасли; б) – по группам профилей

Из приведенного рассмотрения следует, что гнутые полузакрытые профили используются практически во всех отраслях промышленности (преимущественно в строительстве, машиностроении, производстве мебели) и их применение в среднем на 25 – 30 % эффективнее, чем применение фасонных профилей. Поэтому далее рассмотрим только производство гнутых полузакрытых профилей, которое может осуществляться различными способами.

1.2. Альтернативные технологии производства полузакрытых профилей

Приведенный в работе [19] классификатор методов изготовления гнутых профилей подразделяет все методы на пять групп: 1) в кромкогибочных маши-

нах; 2) в штампах; 3) в инструментальных фильерах; 4) в роликах; 5) комбинированным методом. Указанные методы имеют свои области применения и различную экономическую и технологическую эффективность [19], зависящую в совокупности не только от типа профиля и применяемого метода, но и от организационных мер, конъюнктуры рынка и ряда других факторов. Ограничения каждого из методов применительно к производству полузакрытых профилей сведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Недостатки альтернативных методов производства полузакрытых профилей

Метод	Разновидности метода и/или способы	Ограничения метода	Источник
В кромкогибочных устройствах	1. В обычных кромкогибочных машинах 2. В кромкогибах со смещенной осью	Низкая точность деталей	[28]
		Ограничение по длине деталей	
		Невозможность изготовления многоэлементных профилей полузакрытого типа	[19]
		Низкая производительность	[29]
В штампах	1. В стационарной позиции: а) в открытом штампе; б) в закрытом штампе 2. Впередвижку: а) в открытом штампе; б) в закрытом штампе	Низкая точность деталей	[19]
		Ограничения по номенклатуре	[30, 31]
		Низкая производительность	[32]
		Низкое качество из-за зон перекрытия (формовка впередвижку)	[33]
В инструментальных фильерах	1. В обычной фильере 2. В роликовой фильере 3. Проглаживанием по пуансону	Большие силы волочения	[34]
		Сложность изготовления фильер	[35, 36]
		Низкая стойкость фильер	[19]
		Налипание материала (с покрытием)	[27]
		Ограниченные технологические возможности	[27]
Комбинированным методом	1. Профилирование и штамповка 2. Предварительная штамповка и профилирование 3. Профилирование с локальным нагревом	Сложность установки и съема детали	[32]
		Ограниченные технологические возможности	[35, 37]
		Большая трудоемкость и энергопотребление	[24]

В современных кромкогибочных машинах с поворотной траверсой изготавливают в основном открытые профили с небольшим числом зон изгиба с применением ограничителей, фасонных оправок и прижимов [35]. При этом облегчается поэтапное исследование процесса гибки, в том числе с приложением торцевого сжатия, обеспечиваемого смещением оси поворотной траверсы в специальном кромкогибе [24]. Для гибки полузакрытых профилей кромкогибочные устройства практически не применяются в связи с указанными в табл. 1.2 ограничениями.

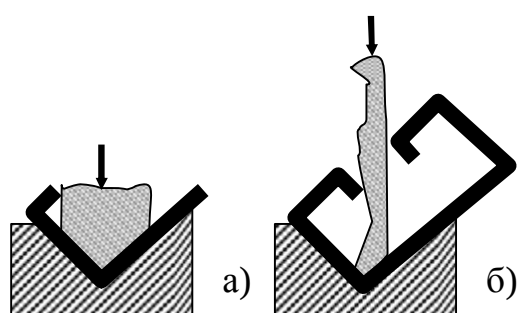


Рис. 1.19. Схемы гибки полузакрытых профилей в открытых штампах

Гибку профилей в штампах можно производить при стационарном положении заготовки или впередвижку. В открытых штампах (рис. 1.19) гибка при стационарном положении заготовки допускает изготовление С-образных профилей с отбортовками, ширина которых составляет не менее шести толщин исходного материала, при достаточной для прохода инструмента ширине проема.

Формовка профиля при стационарном положении заготовки в закрытых штампах обеспечивает более высокую точность размеров сечения, однако в этом случае необходимо применение внутренних оправок. При формовке эластичной средой существуют проблемы базирования заготовки и обеспечения точности размеров элементов детали по ширине [19]. Достоинство метода состоит в том, что можно производить гибку на радиус, равный толщине заготовки, при наборе утолщения в уголковогой зоне до 8...23 % и пружинении менее 1° [31]. В закрытых штампах при стационарном положении заготовки можно изготавливать профили лишь ограниченной длины. Для устранения этого недостатка были разработаны способ и устройство [32, 33] для изготовления профилей повышенной жесткости впередвижку с предварительной формовкой в роликах и последующей осадкой в закрытом штампе с тремя сопряженными между собой участками: плющения,

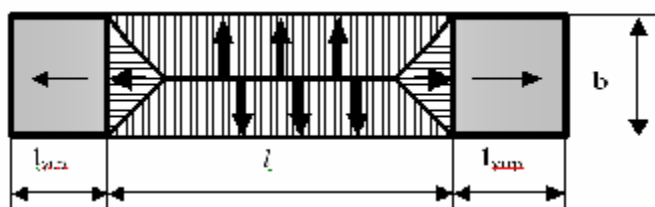


Рис. 1.20. Предотвращение продольного течения металла в закрытом штампе

осадки и калибровки. Формовка профиля осуществляется с удержанием участков, прилегающих к очагу пластической деформации (рис. 1.20). Длина упругих участков $l_{упр}$ определяется формулой:

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

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

Недостаток способа – ограниченные технологические возможности и наличие на профилях следов зон перекрытия.

Изготовление профиля из металлической ленты в инструментальных фильерах осуществляется её протягиванием через фильеру [35, 36]. Основным недостатком этого метода – большие силы трения. Уменьшение сил трения в два-три раза возможно за счет ультразвука [38] или созданием предварительной конфигурации заготовки для облегчения условий волочения: заготовку изгибают предварительно в штампе, а затем протягивают через фильеру. Этот способ является малопродуктивным и применяется для формовки профилей простых конфигураций из труднодеформируемых материалов. Износ фильер в этом случае наступает уже после изготовления нескольких сотен профилей. Часто волочение через фильеру сопровождается кромковой волнистостью и разрывом полок или трещинообразованием по кромкам профиля из-за налипания материала покрытия на фильеру [27]. Замена инструментальных фильер на роликовые [36] уменьшает силы трения в 5...6 раз, однако применение в качестве волоки роликов мало чем отличается от профилирования, осложненного необходимостью задания заготовки в фильеру, громоздкостью технологического оборудования и его низкой производительностью. Указанными недостатками обладает и способ гибки проглаживанием по пуансону, суть которого состоит в сжатии волнообразного участка заготовки в угловой зоне [39]. Этот способ практически непригоден для изготовления полузакрытых профилей из-за сложности изготовления инструмента.

В целом, волочение в фильерах практически непригодно для производства полузакрытых профилей из-за значительных сил формообразования, сложности изготовления фильер и их низкой стойкости, ограниченных технологических возможностей. Изготовление гнутых полузакрытых профилей в роликах

описано ниже, в разд. 1.3, где указаны преимущества данной технологии перед альтернативными технологиями, анализируемыми в данном разделе.

В **комбинированных методах** сочетаются различные процессы для изготовления гнутых профилей. Известен процесс, совмещающий предварительную гибку и последующую штамповку в открытом штампе [37], а также способ [32], в котором волнообразную заготовку получают в роликах, затем осаживают ее в закрытом штампе. В другом способе работы [37] заготовку изгибают в штампе или в роликах, а потом обкатывают роликом по оправке. Известны и другие процессы, совмещающие различного вида нагрев с профилированием или же профилирование с волочением [24]. Недостатки этих способов указаны в табл. 2 и они мало пригодны для производства полузакрытых профилей.

В целом, технологии, являющиеся альтернативными по отношению к профилированию, характеризуются низкой экономической эффективностью, весьма ограниченными технологическими возможностями и их использование в современном производстве, даже мелкосерийном, не может считаться целесообразным.

1.3. Методы изготовления гнутых профилей в роликах

Формообразование гнутых профилей в роликах может быть условно разделено на традиционное профилирование (ТП) [21, – 43], интенсивное деформирование (МИД) [44, 19, 4] и стесненный изгиб (СИ) [36, 24].

В сравнении с рассмотренными выше альтернативными методами производства гнутых профилей, их формообразование в роликах является более универсальным методом, имеющим следующие преимущества: 1) возможность изготовления профилей с минимальной толщиной стенок и весьма разнообразной номенклатуры; 2) возможность замены сочетания нескольких стандартных профилей в конструкциях одним, имеющим сложную конфигурацию; 3) незначительные отходы металла, не превышающие обычно 1 – 2 %; 4) высокое качество поверхности профиля, с шероховатостью, не превышающей 0,63 мкм; 5) возможность изготовления профилей из заготовок с покрытием; 6) высокая точность размеров профилей, не ниже 8 – 10 квалитетов; 7) сравнительно высокая производительность труда и адаптируемость технологии к масштабам производства; 8) возможность совмещения профилирования с другими производственными процессами (правка, отрезка, гибка по контуру); возможность механизации и автоматизации производства и др.

В табл. 1.3 даны отличительные черты каждого из этих методов формообразования профилей в роликах [45]. Рассмотрим их по характерным показателям согласно табл. 1.3, начиная со сферы применения методов. Традиционное профилирование рассчитано на массовое производство и предусматривает использование многоклетевых профилегибочных машин с числом клетей от 10 до 52 [19], причем, «катающие диаметры» роликов обычно более 200 мм [44]. Скорость профилирования находится в диапазоне от 12 до 60 м/мин и более. Длина производственных линий традиционного профилирования достигает нескольких десятков метров. Это требует значительных производственных площадей и складских территорий для хранения технологической оснастки, что связано с высокими затратами на содержание производственных помещений. Освоение одного типоразмера профиля обходится в 50 тыс. долларов в ценах 2007 года, а 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 [17].

Метод интенсивного деформирования наиболее эффективен в средне- и мелкосерийном производстве вследствие меньшего числа переходов, чем в ТП. При этом применяемое профилировочное оборудование (рис. 1.21) является сравнительно компактным и дешевым, что способствует его востребованности на сегменте рынка малого бизнеса. Стоимость автоматизированных линий отечественного производства для реализации МИД составляет от 50 до 100 тыс. долларов, а затраты на освоение одного типоразмера профиля не превышают 100 – 200 тыс. руб. в ценах 2007 года [45].

Область применения стеснённого изгиба (СИ) – преимущественно самолетостроение. В СИ, как и в МИД, изготовление профилей осуществляется за малое число переходов, однако изготавливать можно только открытые профили небольших поперечных сечений (примерно 100x50x0,5...1,5 мм). Отсюда видно, что МИД обладает рядом преимуществ перед ТП (в сфере мелкосерийного производства) и имеет более широкие технологические возможности в части изготовления многоэлементных полужакрытых и закрытых профилей по сравнению со стеснённым изгибом.

Кроме того, при СИ профили имеют весьма высокий уровень остаточных напряжений, достигающий (0,5...0,8) σ_s , в случае неблагоприятных схем формообразования.

Таблица 1.3

Сравнительные характеристики методов формообразования профиля в роликах

Харктерный показатель	Традиционное профилирование	Метод интенсивного деформирования	Стесненный изгиб
Сфера применения	Массовое производство	Средне- и мелкосерийное производство	Мелкосерийное и единичное производство
Преимущественная схема деформирования подгибаемых элементов	Монотонное растяжение	Знакопеременная деформация	Монотонное растяжение с поперечной осадкой
Режим формовки радиусагиба	Плавный по переходам	Постоянный по переходам	На последних переходах
Углы подгибки за переход, град.	8..12	10...40	10...40*
Приложение дополнительных сил	—	Аксиальная, тангенциальная***	Тангенциальная, осадка заготовки
Ширина заготовки (Δ - избыток ширины заготовки)	$\Delta \leq 0$	$\Delta \approx 0$	$\Delta \geq 0$
Число переходов	N	$(0,5...0,7) \cdot N$	$(0,4...0,7) \cdot N$
Форма линии центров тяжести сечений	Прямая	Кривая	Кривая
Скорость профилирования, м/мин	12...60 (до 180)	6...30	2...15
Тип калибра	Открытый с высвобождением	Закрытый	Закрытый
Форма калибра предварительных переходов	Прямолинейные участки с сопряжением / высвобождением в угловых зонах	Номинальный калибр без высвобождения	Волнообразная
Диаметры роликов (по межосевому расстоянию)	D	$(0,4...0,7) \cdot D^{**}$	$(0,5...0,7) \cdot D$
Правильное устройство	Не обязательно	Обязательно	Обязательно
Технологические возможности:			
Тип профиля	Любой****	Любой****	Открытый
а) Н/С (Н – высота профиля; С – ширина его дна)	Любые	Любые	Н/С ≤ 2 для прямой схемы; Н/С < 5 для обратной схемы
б) r_b/s_0 (относительный радиусгиба)	$r_b/s_0 > (r_b/s_0)_{\text{допуст.}}$	$r_b/s_0 > 0,5$	$r_b/s_0 > 0$
* – измеряется по наклону прямолинейного участка боковой стенки; ** – различие в значениях средних диаметров; *** – для специальных схем; **** – из существующей или допустимой номенклатуры			

В авиационной промышленности остаточные напряжения не являются существенным ограничением, поскольку профили подвергают последующей закалке с правкой растяжением перед выполнением операций подсечки, малковки и гибки по контуру. Использование профилей с высоким уровнем остаточных напряжений в других отраслях промышленности может отразиться на их сроке службы. Исследованиями европейских и американских ведомств по предотвращению коррозии металлов показано, что при надлежащей защите

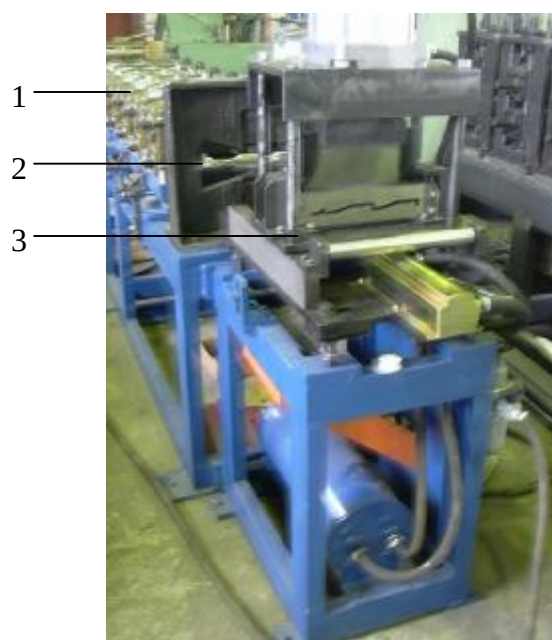


Рис. 1.21. Линия производства сайдинга НПО «ИДМ»: 1 – роликовая оснастка; 2 – правильное устройство; 3 – отрезное устройство

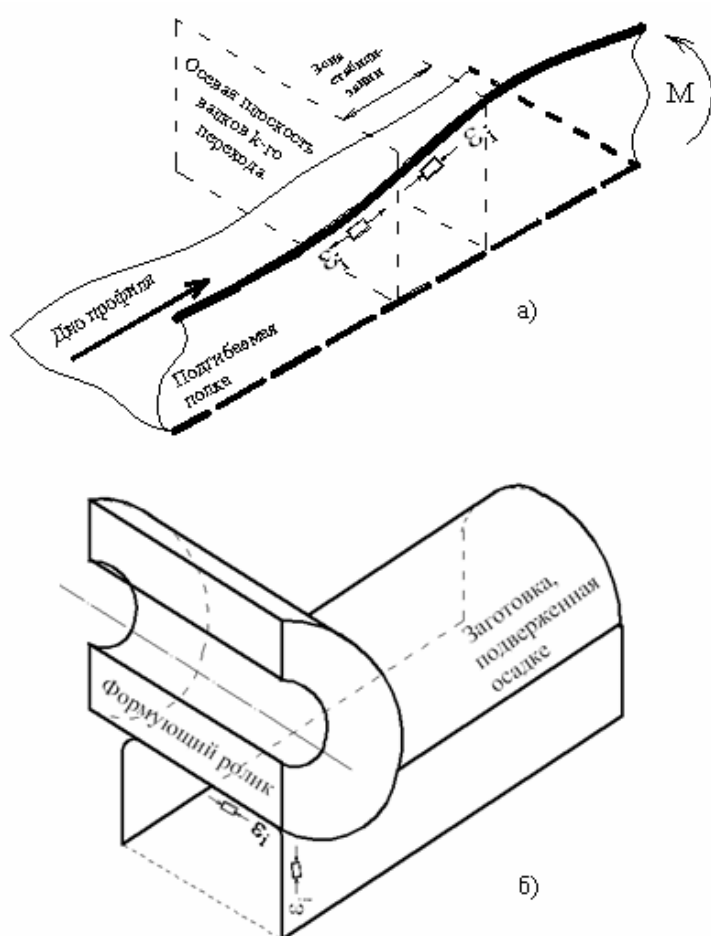


Рис. 1.22. Деформация заготовки: а – деформация подгибаемой полки в МИД; б – схема осадки заготовки при СИ

профилей с умеренными остаточными напряжениями лакокрасочным покрытием их стойкость простирается за 30 лет [4].

Рассматриваемые методы формообразования существенно отличается преимущественными схемами деформирования подгибаемых элементов. При ТП продольная деформация и деформация изгиба незначительны (фактически на границе упруго-пластической области), при МИД продольная деформация несколько выше и является знакопеременной: в зоне перед осевой плоскости валков

это – деформация растяжения, а за осевой плоскостью валков в начале зоны стабилизации это – деформация сжатия (рис. 1.22-а). Деформация сжатия обеспечивается за счет изменения угла выхода заготовки из калибра. При СИ на предварительных переходах заготовке придают волнообразную форму, а на последнем переходе производят ее осадку (рис. 1.22-б). На предварительных переходах подгибаемые элементы приобретают продольные деформации и поперечные деформации противоположных знаков по толщине листа, интенсивность деформаций этих двух видов существенно зависит от конфигурации профиля и схемы формообразования. При осадке заготовки элементы профиля подвержены сжатию, а в угловых зонах происходит гибка с приложением тангенциальных сил, что позволяет получить утолщение угловой зоны и радиус меньше допустимого при обычной гибке. Возможны схемы формообразования с тангенциальным поджатием при плоской стенке, однако для набора утолщения в угловой зоне данная схема пригодна лишь для профилей с малой шириной полок (до $(20...30) S_0$) [24]. Увеличение ширины полки приводит либо к потере ее устойчивости (неплоскостности полки в поперечном направлении), либо к кромковой волнистости, что, безусловно, ограничивает технологические возможности метода.

При интенсивном формообразовании нейтральный слой деформаций практически совпадает со средней линией, в то время как при традиционном профилировании нейтральный слой деформаций смещается к внутреннему контуру, а при стесненном изгибе – к наружному контуру зоны сгиба (рис. 1.23). Отсюда следует, что при стесненном изгибе и интенсивном деформировании происходит разгрузка наружного контура зоны сгиба, что позволяет обеспечивать меньшие радиусыгиба без разрушения заготовки.

Обычно в ТП радиусыгиба принимают переменными по переходам [43]. В ряде схем ТП режимы формовки радиусовгиба принимались изменяющимися по линейному закону как функция

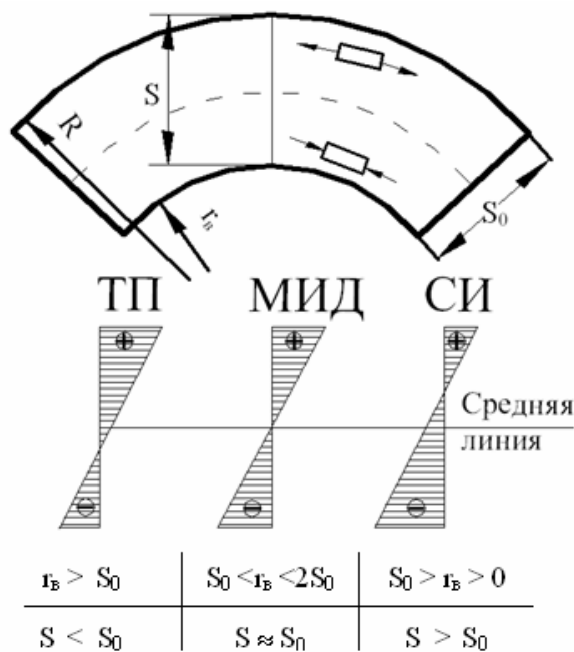


Рис. 1.23. Параметры угловой зоны и окружающие деформации в различных технологиях профилирования

номера перехода [41], в других случаях радиусы гиба закладывались постоянными для всех переходов [42], что делает их сходными в этом отношении со схемами формообразования МИД с тем отличием, что в последнем случае режимы подгибки элементов назначают более жесткими.

В МИД радиусы гиба задаются постоянными для всех переходов [18], что, безусловно, ужесточает схему формовки, однако упрощает расчет калибровок и изготовление роликовой оснастки. Кроме того, жесткая донная часть профиля позволяет более активно влиять на угол выхода профиля из калибра, что способствует предотвращению дефектов типа кромковой волнистости. При СИ понятие режима формовки радиуса гиба достаточно условно: в каждой точке поперечного сечения заготовки присутствует кривизна, отличная от нулевой (за исключением последних переходов [17]).

В ТП углы подгибки назначают исходя из предшествующего опыта, причем диапазоны рекомендуемых углов достаточно размыты в пределах 5...10 градусов [40 – 43] с поправкой на толщину металла и ширину подгибаемых элементов. При этом отмечается, что предельные углы подгибки элементов зависят от геометрических параметров профиля и должны удовлетворять критериям отсутствия потери устойчивости подгибаемых элементов и переформовки заготовки, причем, математическая формализация этих условий не дается.

В МИД для швеллерных и уголкового профилей установлена формализованная процедура назначения углов подгибки из условия выравнивания продольных деформаций подгибаемых элементов по переходам [46] с последующей проверкой по критерию кромковой волнистости и переформовки заготовки. Процедура проверки формализована и представлена соответствующими моделями и алгоритмами в работах [44, 19]. Для полужакрытых профилей вопросы назначения углов подгибки решаются экспериментальным путем для каждого типоразмера.

При СИ углы подгибки задаются в неявном виде на основе решений, полученных из практики и отраженных в патентах [24] и отраслевом РТМ [47].

В отличие от ТП, в методах интенсивного формообразования профилей в роликах (СИ и МИД) кроме силовых факторов, обеспечивающих гибку, предусматривается приложение дополнительных сил к заготовке. В МИД при производстве типовых профилей к заготовке прикладывают дополнительно продольную силу и момент, изменяющий угол выхода профиля из калибра. Указанные силовые факторы обеспечиваются надлежащим выбором формы калибров, со-

отношений диаметров формирующих роликов по переходам и условий замыкания калибров [48]. В необходимых случаях для уменьшения пружинения применяют подсадку за счет избытка ширины заготовки. При СИ дополнительные силы сжатия обеспечиваются избытком ширины заготовки и присущей стесненному изгибу схемой осадки заготовки в роликах последнего перехода [24].

В ТП ширина заготовки берется равной теоретической развертке сечений готового профиля или уменьшенной на величину вытяжки материала в местах изгиба. В МИД ширина заготовки незначительно превышает размер теоретической развертки профиля, а при СИ избыток ширины заготовки определяют по расчетным зависимостям [47].

Число переходов для традиционного профилирования в отечественной практике определяют исходя из предшествующего опыта с корректировкой по результатам отработки технологии. В зарубежной практике предпринимались попытки формализации процедуры определения числа переходов [49] в зависимости от так называемой «функции формы» Φ :

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

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.

Данная модель не учитывает параметры оборудования и выбранный способ (схему) формообразования. В МИД число переходов для профилей типовой номенклатуры (уголок, швеллер, зетовый и корытообразный профили) определяют по формуле [44]:

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos a)}{L_M \cdot n} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_s \cdot s}} \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где F – функция формы; L_M – межклетьеовое расстояние профилировочного станка, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм; a – суммарный угол подгибки боковых полок, град; C – ширина дна профиля, мм; R – средний радиусгиба, соответствующий 95 % уровню охвата зоны сгиба пластическими деформациями.

циями, мм; r_{ϵ} – внутренний радиус зоны сгиба, мм; s – толщина заготовки, мм; n – число зон сгиба профиля.

В указанной работе [44] также приведены регрессионные зависимости для определения числа переходов для каждого типа профиля, которые удовлетворительно согласуются с данными приведенной модели. Модели числа переходов для полузакрытых профилей при использовании МИД отсутствуют.

При СИ число переходов для профилей типовой номенклатуры установлено на основе экспериментальной отработки технологии изготовления около 300 профилей различного типоразмера [24].

Важной характеристикой технологии является форма линии центров сечений заготовки по переходам, которая зависит от схемы формообразования и принципа формовки угловых зон. В ТП при разработке технологии центры тяжести сечений, как правило, располагают на одном уровне, в то время как в МИД на одном уровне во всех переходах располагают базовый элемент или его характерную точку. При СИ руководствуются принципом эквидистантного вложения габаритов. Скорость профилирования, указанная для различных методов в табл. 1.3, установлена на основе опытных данных и связана со скоростью протекания деформации и релаксации при формообразовании.

Рассматриваемые методы формообразования существенно различаются по характеристикам применяемой технологической оснастки. Так, в ТП применяют открытые калибры с высвобождением угловых зон; контур калибра образует совокупность прямых линий, сопряженных дугами окружностей под участки изгиба со стороны внутреннего контура. В МИД применяют закрытые калибры (рис. 1.24) без высвобождения в угловых зонах с предписанными параметрами допусков [27] и условий замыкания калибров [48]. При СИ контур калибра образуют две волнообразные линии, разнесенные на толщину заготовки и замкнутые по торцам калибра отрезками прямых линий. При этом диаметры формирующих роликов в МИД и СИ примерно в 1,5 раза меньше, чем в ТП, что обусловлено, с одной стороны, отсутствием необходимости переточки роликов (хотя допускается до двух переточек при необходимости), а с другой стороны, компактностью применяемого оборудования.

В методах интенсивного формообразования применение правильных устройств (рис. 1.25) является обязательным [24, 27], а в ТП иногда предусматри-

вают калибровку профиля в последней клети вместо применения правильного устройства [41].

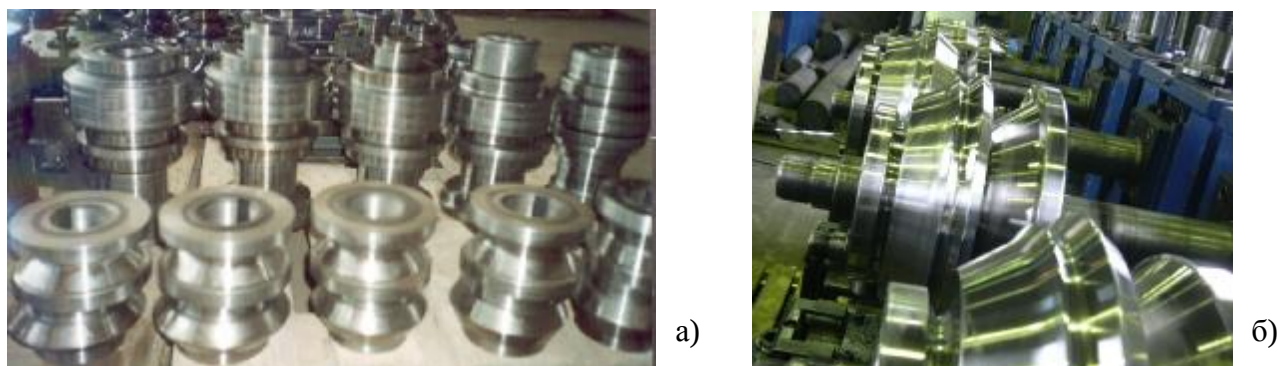


Рис. 1.24. Роликовая оснастка для интенсивного деформирования: а – отдельно стоящая; б – смонтированная на рабочих валах профилировочного станка

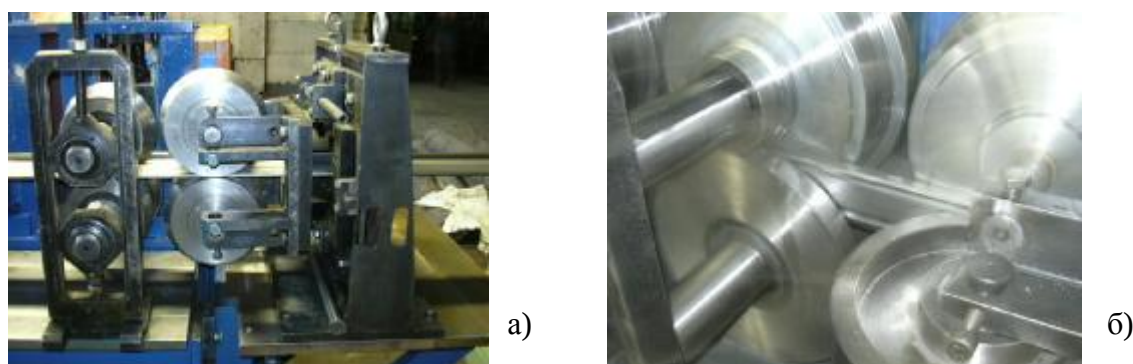
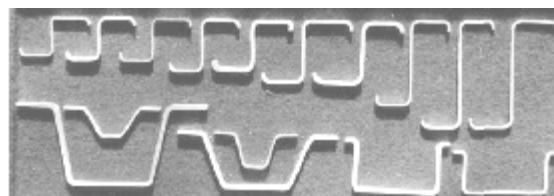


Рис. 1.25. Правильное устройство профилировочного станка:
а – общий вид; б – крупный план

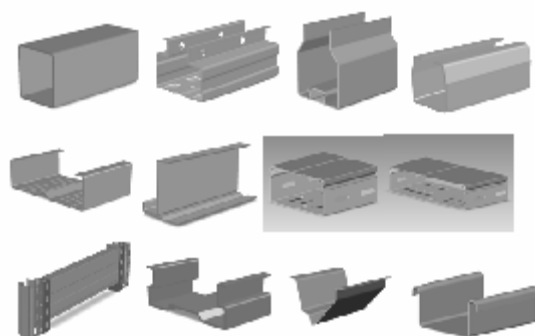
Что касается технологических возможностей, то в сравнении с традиционным профилированием технологии интенсивного формообразования (СИ и МИД) обладают рядом преимуществ: возможность производства открытых профилей повышенной жесткости: с утолщением зоны сгиба до (20 – 30) % и минимальным радиусом гиба в 2 – 3 меньшим радиуса гиба, допускаемого при традиционных методах гибки; возможность деформирования высокопрочных материалов, обладающих низкими пластическими свойствами (СИ), или производства многоэлементных профилей с радиусами гиба не превосходящими допустимых при обычной гибке в отсутствие утонения материала в зоне сгиба (МИД); возможность использования компактного оборудования, имеющего малые габариты и невысокую стоимость при относительно небольшом энергопотреблении; использование малого количества средств технологического оснащения, что позволяет сократить затраты на технологическую подготовку производства и уменьшить время и трудоемкость переналадок оборудования.

Тенденции развития и применения рассматриваемых методов профилирования в отечественной промышленности обусловлены тремя основными факторами: 1) появлением на рынке листовых материалов с покрытием; 2) разработкой большого числа конструкций на основе гнутых профилей в строительной индустрии, производстве мебели и др.; 3) развитием малого бизнеса.

С 2000 года наблюдается ориентация небольших компаний на технологии интенсивного формообразования [50] и сокращение рынка технологий традиционного профилирования. Это объясняется появлением новых разработок продуктов, включающих гнутые профили, и необходимостью изготовления пилотных партий таких продуктов для исследования рынка, а с другой стороны – изменчивостью современного рынка, более оперативного реагирования небольших фирм на его запросы. Что касается СИ, то он используется преимущественно в авиационной промышленности (рис. 1.26-а). Отметим, что только в 2007 году разработчиками технологий интенсивного формообразования г. Ульяновска поставлено на российский рынок около 40 автоматических линий производства гнутых профилей и освоено более 350 типоразмеров профилей для различных отраслей промышленности (рис. 1.26-б).



а)



б)

Рис. 1.26. Профили, изготовленные по технологиям интенсивного формообразования: а – авиационные профили из алюминиевых сплавов, изготовленные СИ; б – стальные профили, изготовленные МИД (слева направо построчно): трубчатый профиль для производства мебели, перфорированный силовой профиль, силовой строительный профиль, балка строительная, строительный профиль, дверной профиль, лоток электромонтажный, лоток кабельный, стеллажные профили, технопрофиль, автомобильный порог, автомобильный бампер

Хотя многие научные проблемы производства МИД широкополочных швеллерных профилей можно считать решенными, а процедура проектирования и отработки профиля становится рутинной операцией, разработка и освоение технологии полузакрытых профилей с элементами жесткости [51 – 53], изготавливаемых из материалов с различными видами покрытий [4], представляет собой в настоящее время актуальную научную и производственную задачу. В

частности, не исследовано поведение заготовки с элементами жесткости в межклетьевом пространстве, не решены вопросы потери ее устойчивости, остаются нерешенными задачи сохранности покрытий, утонения и ряд других.

1.4. Профилировочное оборудование

Формообразующее оборудование для производства гнутых профилей в составе автоматических линий включает профилировочные станки, оснащенные направляющими и подающими устройствами, проводящими и правильными устройствами. В состав автоматических линий профилирования также входят рулонницы, перфорирующее, отрезное и дополнительное оборудование (столы приемные, штабеллеры и т.п.). Многие компании-изготовители гнутых профилей имеют и раскройное оборудование, включающее рулонницы, правильные машины, дисковые ножницы, загрузочное оборудование (краны, тележки), ножницы и прессы для поперечной резки и обески.

Зарубежные компании поставляют на рынок разнообразное оборудование для производства гнутых профилей. Широко известны малогабаритные транспортабельные (на прицепах) станки фирмы “Knudson Manufacturing” (США) и достаточно подробно описанные в работе [4]. Фирмы “IMM” и “Rollsec Ltd.” (США) производят профилировочные машины с числом клеток от 11 до 18 для профилирования рулонного металла толщиной от 0,8 до 6,0 мм со скоростью профилирования до 50 м/мин [27].

Сингапурская фирма “Dynaform” выпускает профилировочные станки 13 моделей с числом клеток от 8 до 23 и производительностью до 40 м/мин для производства гнутых профилей из материала толщиной от 0,2 до 3,5 мм. Станки имеют электронные регуляторы скорости и программаторы задания последовательности операций отрезки и перфорации. Межклетьевое расстояние в этих станках составляет величину от 150 до 360 мм [4].

Итальянские фирмы “Piemme” и “STAM” выпускают профилировочные станки с числом клеток до 40 и 32 соответственно (рис. 1.27). Станки входят в состав автоматических линий с контролем выходных параметров профиля. Настройка режимов профилирования осуществляется вручную. Фирма “STAM” выпускает профили для силовых конструкций в строительстве с толщиной



Рис. 1.27. Линия итальянской компании «Stam»

стенок от 4 мм и высотой до 108 мм [54]. Еще одна итальянская компания “Dalan” выпускает профилировочные машины для формовки профилей с толщиной стенки до 2 мм в 12 клетях с раздвижными узлами, содержащими технологическое оснащение, на рабочих валах [55]. За счет раздвижных узлов обеспечивается возможность изготовления профилей с различной шириной дна. Станки имеют производительность от 30 до 120 м/мин.

Немецкая фирма “Dreistern” производит 18 видов профилировочных станков для формообразования профилей из ленты толщиной 0,5 до 8 мм. Станки перенастраиваются вручную путем горизонтального и вертикального смещения роликов; число клеток – 7 – 9 [56].

Южнокорейская фирмы “Re-Ingeneering” и “Il-Kwang” выпускают станки с числом клеток до 30; скорость профилирования – до 30 м/мин [27, 57]. Толщина обрабатываемого материала – до 2 мм, причем, станки фирмы “Il-Kwang” имеют возможность формовки профилей с заданной продольной кривизной (рис. 1.28).



Рис. 1.28. Станок для производства автомобильных деталей с продольной кривизной

Профилировочные агрегаты с двухстоечными клетями и с консольными двойными рабочими валами («дуплекс») производит канадская компания “Samco” [27]. Привод таких агрегатов может быть общим, через конические передачи или от индивидуальных редукторов. Число клеток в таких агрегатах – от 8 до 18.

Профилировочные станки финской компании “Sintech” содержат обычно 13 клеток с межклетьевым расстоянием 365 мм. Станки имеют цепной привод на верхние валы и скорость профилирования до 30 м/мин [58]. Модели станков этой компании с большим числом клеток (рис. 1.29) могут иметь производительность до 80 м/мин.



Рис. 1.29. Профилировочный станок компании «Sintech»

Производителями аналогичных профилировочных станков являются и многие другие компании из различных стран: Великобритании, Франции [59], Германии [60], Испании [19], Австрии [27], Голландии [27] и ряда других.

Анализ сфер применения и общих характеристик зарубежного профилировочного оборудования позволил установить следующее: 1) сфера применения – крупносерийное производство; 2) специализация – узкая номенклатура профилей; 3) производительность – преимущественно до 30 м/мин; 4) количество клеток – от 12 до 52. Конструктивная реализация профилировочных станков достаточно разнообразна. Можно отметить лишь, что конструкция клеток преимущественно консольная; верхние валы – приводные и регулируемые по высоте; станки оснащаются направляющими устройствами и несколько реже – межклетьевыми проводками и правильными устройствами.

Российские производители профилировочных станков представлены большим числом мелких фирм, не являющихся разработчиками технологии, а также несколькими специализированными предприятиями-разработчиками технологии и оборудования, среди которых ООО «Аркада» (г. Смоленск) [61], ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ» (г. Ульяновск) [50], ОАО «Ульяновский НИАТ» [44], компания «Альта-Транс» (г. Москва) [62].

Профилировочные станы ООО «Аркада» имеют блочную структуру: каждый блок содержит пять клеток. Привод осуществляется через шарнир с подачей на верхний или нижний вал; между валами имеется зубчатая передача. Как видно из табл. 1.4, станы имеют большую массу, энергопотребление, высокую стоимость технологического оснащения, составляющую до 50 % от стоимости основного оборудования, в то время как для технологий на основе МИД стоимость технологического оснащения примерно вдвое дешевле [27].

В последние годы применение метода интенсивного деформирования (МИД) и расширение номенклатуры гнутых профилей вызвали необходимость разработки профилировочного оборудования, имеющего широкие технологические возможности и эксплуатационную надежность, при обеспечении оптимума капитальных и эксплуатационных издержек [63]. Такое оборудование создано ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ», поставляющими ежегодно на отечественный рынок до 20 автоматизированных линий, на которых производится порядка 150 типоразмеров вновь осваиваемых профилей, в том числе около 30 типоразмеров эксклюзивных конфигураций [52]. Состав автоматизированных линий различных типов приведен в табл. 1.5.

Таблица 1.4

Технико-экономические характеристики станов ООО «Аркада»

Тип стана	Ширина заготовки, мм	Потребляемая мощность, кВт	Количество клеток	Скорость профилирования, м/мин	Мин. и макс. толщина полосы, 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

Таблица 1.5

Состав автоматизированных линий разработки НПО «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 (пневматич.)	+	+	+	+		
Синхронизатор шага перфорации					+	
Профилировочный станок / стан	+	+	+	+	+	+
Пресс с отрезным летучим штампом						+
Пила отрезная с синхронизатором					+	+
Отрезное устройство (пневматическое)	+	+	+	+		+
Стол приемный (со сбрасывателем)	+	+	+	+	+	+
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). * - по заказу						

Профилировочные станки указанных компаний имеют одну рабочую зону, цельную или модульную конструкцию с приводом формирующих 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» (рис. 1.30). Станки снабжены направляющими и правильными устройствами различных типов. В табл. 1.6 да-

ются характеристики универсального станка СПУ-400K8x65 [64] для линий «среднего типа».

Таблица 1.6

Основные характеристики станка СПУ-400K8x65

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Максимальная глубина профилирования	мм	60
Скорость профилирования,	м/мин	8 – 10
Максимальная толщина заготовки	мм	0,5 – 2,0
Максимальная ширина заготовки	мм	360
Мощность электродвигателя стана	кВт	11

В 1986 – 2008 гг. ОАО «Ульяновский НИАТ» разработало ряд станков семейства ГПС (табл. 1.7) для мелкосерийного производства профилей, в первую очередь для нужд авиационной промышленности [17, 24].



Рис. 1.30. Четырехмодульный станок СПУ-400K16x65 для реализации метода интенсивного деформирования

Как правило, станки семейства ГПС (рис. 1.31) имеют цельную станину, клетки монтируются на рабочий стол станины; привод – через зубчатые колеса или карданные валы на оба вала рабочей клетки; верхний вал – регулируемый по высоте; станки имеют направляющее и правильное устройства.



Рис. 1.31. Станок ГПС-300M6 ОАО «Ульяновский НИАТ»

Станки компании «Альта-Транс» (г. Москва) предназначены для производства гнутых профилей из рулонных сталей с покрытием толщиной от 0,45 до 0,60 мм [62]. Клетки станков (рис. 1.32) – двухопорные; привод – на нижние валы че-

рез цепную передачу; число клетей – от 14 до 20; мощность двигателей – 3,3 кВт, скорость профилирования – до 16 м/мин.

Таблица 1.7

Станки семейства ГПС

Модель станка	Год разработки	Число клетей	Отрасли применения
1. ГПС-200	1986	4	Авиация: («Буран») (ЯК-48)
2. ГПС-200 М	1987	● 1 + 4	Авиация: ИЛ-114
3. ГПС-200М1	1989	● 1 + 4	Авиация: (ТУ-204)
4. ГПС-300	1991	4	Авиация: ИЛ-103
5. ГПС-300М	1993	4	Авиация: ТУ-334
6. ГПС-300М6	1995	6	Авиация: БЕ-200, Ан-140
7. ГПС-300М8	1999	8	Строительство, электротехническая промышленность, дорожное строительство, автомобилестроение, производство мебели
8. ГПС-500М6	2002	6	
9. ГПС-300М12	2004	12	
10. ГПС-300М16	2005	16	
11. ГПС-500М12	2007	12	
● – Подающая клеть с приводными валами			

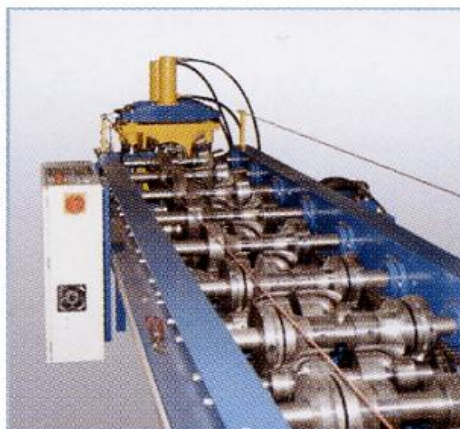
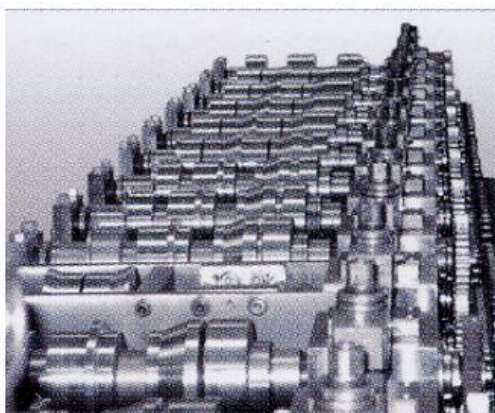


Рис. 1.32. Станки компании «Альта-Транс»

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

На ряде металлургических предприятий до настоящего времени сохранились станы разработки Украинского НИИ Метталлов (УкрНИИМет) для производства широкого сортамента профилей (ширина заготовок – от 30 до 1500 мм, толщина – от 0,5 до 8,0 мм) [1, 2]. Эти станы имеют значительное количество клетей с рабочими валками диаметром свыше 350 мм [42], что делает их мало-пригодными для мелкосерийного производства.

Мелкие фирмы-производители хотя и решают отчасти задачи насыщения отечественного рынка профилировочным оборудованием (часто без учета номенклатуры профилей и реализуемого метода формообразования), однако клиентам этих фирм приходится заказывать технологическую оснастку у специализированных фирм. Часто такое разделение технологии и оборудования приводит к неоправданным экономическим издержкам. Данная ситуация возникает из-за отсутствия классификаторов профилировочного оборудования и рекомендаций по его применению в зависимости от номенклатуры профилей, характера производства, метода формообразования и других сопутствующих факторов. Можно лишь отметить, что для реализации метода интенсивного деформирования в условиях мелкосерийного производства наиболее подходящими являются модульные станки ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ».

1.5. Материалы, применяемые для изготовления гнутых профилей

Материалы для производства гнутых профилей в различных отраслях промышленности представляются преимущественно сталями без покрытия и с покрытиями различного вида.

Материалы без покрытия представляются в основном низкоуглеродистыми сталями [65], обладающими хорошими деформационными свойствами. В первом приближении деформируемость стали можно оценивать отношением предела текучести к пределу прочности или величиной относительного удлинения [66, 67]. Наиболее часто для производства гнутых профилей применяют марки сталей Ст2 – Ст6 (спокойные или кипящие), сталь 08кп, сталь 10 кп, сталь 08Ю [68]. Для указанных марок сталей относительное удлинение превышает 20 %. К тому же листовые материалы обладают анизотропией [69], которая влияет на силовые параметры процесса (в сторону увеличения до 30 %).

За рубежом и в России для защиты металла от коррозии применяют цинкование горячим или электролитическим способом [70, 71]. Первый способ обеспечивает лучшую адгезию и прочность, что обеспечило его применение в 70 % случаев [4]. При этом толщина покрытий сталей российского производства достигает 60 мкм, а сталей зарубежного производства – 25 мкм.

Цинкование стали обеспечивает снижение трения между материалом и инструментом за счет деформации покрытия и удержания смазки [27]. Цинковое покрытие нарушается при больших контактных напряжениях, а также при изгибе заготовки на радиус, близкий к нулевому [4]. При интенсивном дефор-

мировании нарушение поверхности оцинкованной заготовки имеет место при больших контактных напряжениях, а перенос покрытия на формующий инструмент – лишь при неудовлетворительном качестве покрытия заготовки. Иногда цинковое покрытие выступает индикатором наступления потери устойчивости – на покрытии подгибаемых полок появляются темные полосы: линии скольжения (линии Чернова-Людерса).

Материалы с органическим покрытием [72], удовлетворяющие требованиям малой продолжительности формирования и сушки покрытия, хороших декоративных свойств, достаточной коррозионной стойкости и устойчивости к дальнейшей переработке, все чаще применяются в последние годы [27].

Органические покрытия подразделяют на термореактивные (акриловые, полиэфирные (ПЭ), эпоксидные (ЭП)), термопластичные (поливинилхлоридные пластизоли (ПЛ), органозоли) и пленки (на основе поливинилхлорида (ПВХ) и полиэфиров). Из полимерных покрытий листа или ленты пленки и термопластичные покрытия обладают высокими физико-механическими и антикоррозионными свойствами, в то время как термореактивные покрытия имеют весьма высокие декоративные свойства и атмосферостойчивость [4].

Для профилирования наиболее важным свойством покрытия является его эластичность. Покрытие на основе ПВХ-пластизолой толщиной 200 мкм является наиболее долговечным и способно выдерживать деформации до 60 % [4]. Наилучшими для профилирования свойствами покрытий обладает продукция НЛМК, доля которой на российском рынке превышает 65 % [19].

В последние годы все чаще применяют комбинированные покрытия (рис. 1.33) – сочетание полимерного и цинкового покрытия ("дуплекс") [27]. Материалы «дуплекс» обладают повышенными антикоррозионными свойствами, однако их технологические свойства имеют существенный недостаток по сравнению с материалом без цинкового покрытия: адгезия между холоднокатаным листом и полимерным покрытием выше, чем между последним и оцинкованным листом [4]. Из анализа сочетаемости материалов

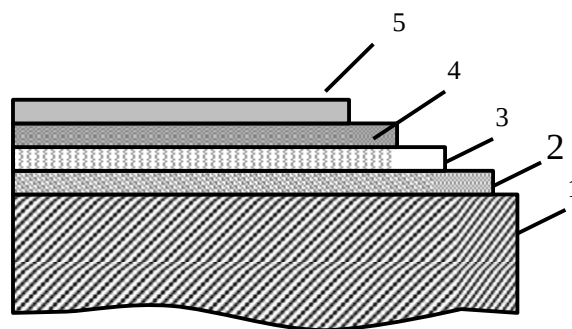


Рис.1.33. Структура листового материала с комбинированным покрытием: 1) – подложка; 2) – металлическое покрытие; 3) – грунт; 4) – краска (эмаль); 5) – лак

подложки, покрытий и толщины слоев (табл. 1.8) следует и различие технологических свойств материалов с покрытием «дуплекс» [4].

Таблица 1.8

Сочетаемость материалов и толщина покрытий

Слой / вид покрытия	ПЭ	ПУ	ПЛ	Пленка	Толщина, мкм
Защитная пленка	+/-	—	—	—	100
Полимерное	+	+	+	+	25 – 250
Грунт (клей)	+	+	+/-	+	5 – 10
Антикоррозионное	+	+	+	+	1
Защитное металлическое	Zn	Zn	Zn/-	Zn/-	2 – 60
Подложка	Fe	Fe	Fe	Fe	400 – 800
Защитное металлическое	Zn	Zn	Zn/-	Zn/-	2 – 60
Антикоррозионное	+	+	+	+	1
Грунт	+	+	+	+	5 – 10
Полимерное	+/-	—	—	—	25 – 35
Сочетаемость: «+» – хорошая; «+/-» – средняя; «-» – плохая					

Учет характеристики покрытия материала необходим для оценки технологичности изготовления профиля, поскольку в ряде случаев наблюдается повреждение поверхности у многоэлементных профилей и профилей с элементами двойной толщины при их формовке, а для профилей с толщиной стенки более 1,5 мм характерно нарушение слоя покрытия вследствие больших контактных напряжений. Кроме того, иногда сертификационные характеристики покрытия поставляемого материала не соответствуют его реальным характеристикам, что вызывает необходимость решения вопроса об оценке свойств покрытия на месте отработки технологии.

1.6. Дефекты полужакрытых профилей и требования к их качеству

При отработке технологии изготовления гнутых полужакрытых профилей могут возникать дефекты заготовки или профиля (рис. 1.34), выявленные при отработке технологии в НПО «ИДМ» (г. Ульяновск) в 2005 – 2009 гг.

Дефекты полужакрытых профилей на рис. 1.34, характерны для МИД. Ниже дано описание этих дефектов и их возможные причины, а в разделе 1.7 работы обсуждаются причины их возникновения более подробно.



Рис. 1.34. Классификатор дефектов полузакрытых профилей

Дефекты форм и размеров. Отклонения габаритов сечения профиля проявляются в виде избыточной ширины или высоты из-за упругой отдачи и вследствие изменения ширины заготовки в процессе формообразования (рис. 1.35-а). Саблевидность (рис. 1.35-б) обычно является следствием несимметричного сечения профиля и ошибочной схемы формообразования. Продольный прогиб (рис. 1.35-в) часто возникает из-за различия продольных деформаций дна профиля и подгибаемых элементов. Впрочем, эти два дефекта отчасти могут устраняться правильным устройством. Отклонения по радиусу и по углу связаны с эффектом пружинения (рис. 1.35-д, и). Отклонения по толщине (рис. 1.35-е) обычно связаны с утонением заготовки на уровне зон изгиба.

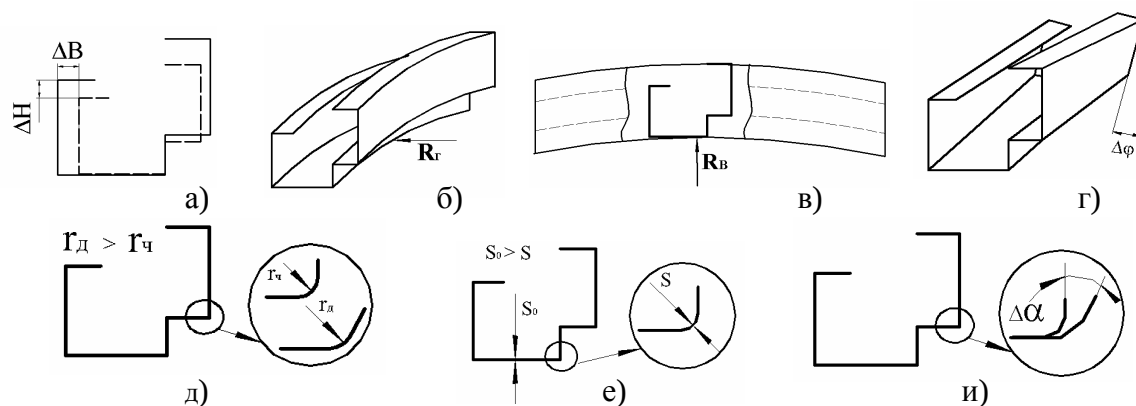


Рис. 1.35. Дефекты форм и размеров полузакрытых профилей при интенсивном формообразовании: а) – отклонения габаритов сечения; б) – саблевидность; в) – продольный прогиб; г) – скрутка; д) – отклонения по радиусу; е) – отклонения по толщине; и) – отклонения по углу (пружинение)

Предварительный учет изменения форм и размеров профиля на стадии разработки технологии его изготовления позволяет обеспечить надлежащее качество профиля и существенно снизить затраты на его отработку. Требования к качеству профилей [4, 19, 24, 27] по этим показателям приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Требования к гнутым профилям в машиностроении

Параметры	Размер	Допуск	Примечание
Габариты сечения	До 50 мм 50 – 100 мм 101 – 200 мм более 200 мм	$\pm 1,0$ мм $\pm 1,5$ мм $\pm 2,0$ мм $\pm 3,0$ мм	Авиастроение: отклонение от шаблона – не более чем на 0,2 мм
Саблевидность	Любой	До 1 мм/м	
Продольный прогиб	Любой	До 1 мм/м	Авиастроение: до 1,5 мм/м
Скрутка	Любой	До 1 град/м	Суммарная $< 15^\circ$
Допуск на радиус	Любой	По ОСТ 100022-80	Авиастроение
Угловые размеры	Любой	$\pm 30'$	Авиастроение
Толщина	1,0 мм 1,5 мм 2,0 мм	$\pm 0,11$ мм $\pm 0,14$ мм $+0,17/-0,21$ мм	Авиастроение: в пределах $\frac{1}{2}$ минусового допуска по РТМ1.4.1630-86
Качество поверхности	–	Требование отсутствия нарушений поверхности	Авиастроение: микронеровности в зоне изгиба не более 30 мкм
Волнистость кромки	Любой	До 2 мм	Авиастроение: не допускается

Эти требования не являются исчерпывающими: заказчики профильной продукции обычно резюмируют свои требования в ТУ на их поставку [6 –16].

Дефекты поверхности. Причиной нарушения покрытия заготовки (рис. 1.36) обычно являются значительные контактные напряжения, возникающие из-за ошибочных схем формообразования, и в редких случаях – шероховатость рабочей поверхности формующих роликов. Указанные виды дефектов и их причины достаточно подробно описаны в работе [4]. Линии Чернова-Людерса возникают при значительных сдвиговых деформациях и наблюдаются на цинковом покрытии заготовки (рис. 1.37).

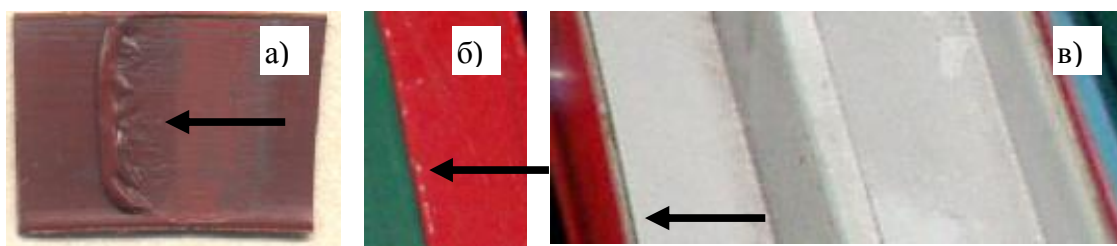


Рис. 1.36. Дефекты покрытия гнутых полузакрытых профилей: а – наплывы покрытия из полиуретана и пластизола толщиной более 50 мкм после обжима в роликах при $\epsilon_z \approx 50\%$; б – спорадический сдир покрытия у основания угловой зоны; в – полный сдир покрытия зоны изгиба элемента двойной толщины Ш-образного профиля

В строительстве требования к сохранности покрытия не очень жесткие: «На поверхности цинкового или лакокрасочного покрытия профилей допускаются потертости, риски, следы формообразующих валков, не нарушающие сплошности покрытия» [5]. Другие требования к гнутым профилям, применяемым в строительстве, изложены в работах [9, 10, 15].

Дефекты неустойчивости деформирования и разрушения полузакрытых профилей, изготавливаемых МИД, в научной литературе практически не освещены. Авторами работы на протяжении пяти лет собраны дефектные образцы профилей и предпринята попытка их систематизации (см. рис. 1.34). Рассмотрим последовательно дефекты заготовок, возникающие при отработке технологии полузакрытых профилей.

Неустойчивость захвата входного участка заготовки (рис. 1.38) возникает вследствие завышенных углов подгибки или неверной обрезки конца заготовки. Дефект может проявляться в форме гофрения переднего края заготовки.



Рис. 1.37. Линии Чернова-Людерса (полосы скольжения) на полке профиля

Закусывание входного участка (рис. 1.39) происходит из-за неверной обрезки переднего конца заготовки или неправильной подачи заготовки в калибр.



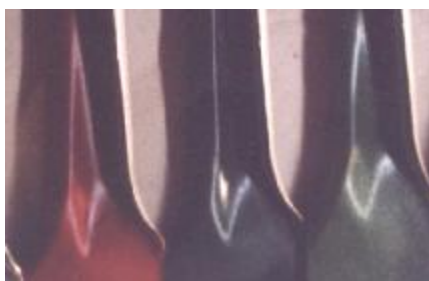
Рис. 1.38. Неустойчивость захвата входного участка заготовки

Продольное «складывание» дна профиля (рис. 1.40) имеет место вследствие высвобождения угловых зон калибра, больших радиусов изгиба, увеличенного зазора в роликах или избыточной ширины развертки заготовки по отношению к развертке роликового калибра.



Рис. 1.39. Закусывание входного участка

Закусывание периферийного элемента возникает из-за ошибок конструирования формирующих роликов в части замыкания калибров [48], особенно в схемах с горизонтальным положением периферийного участка (рис. 1.41).



Смятие периферийного элемента (рис. 1.42) может быть вызвано ошибками назначения углов подгибки периферийных элементов.



Рис. 1.40. Продольное складывание дна профиля

Рис. 1.41. Закусывание периферийного элемента

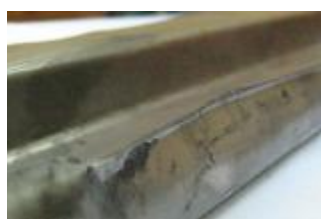


Рис. 1.42. Смятие периферийного элемента

Кромковая волнистость (рис. 1.43) образуется из-за неравномерности распределения продольных деформаций по сечению профиля [73, 74] при жест-

ких режимах формовки [75, 76]. Допустимая амплитуда кромковой волнистости по ГОСТ 8283-93 составляет 2 мм при минимальном периоде 500 мм (по DIN 59413 – 0,3 мм при шаге волны не менее 500 мм) [77].

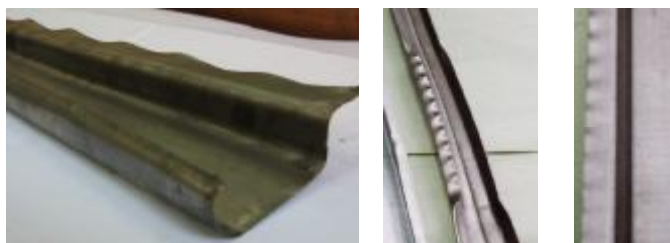


Рис. 1.43. Кромковая волнистость на периферийных элементах профиля

Выпучивание полок профилей преимущественно коробчатого сечения (рис. 1.44) происходит из-за превышения величин «стеснения» заготовки в схемах формовки с переменным радиусом или из-за избыточных углов подгибки полок с элементами жесткости [77]. Этот дефект фактически имеет те же причины, что и кромковая волнистость.



Рис. 1.44. Выпучивание полок

Излом полок с элементами жесткости (рис. 1.45) возникает по причине ошибочной схемы формообразования [27] или из-за отклонений настройки роликовых калибров. Излом полки является неисправимым дефектом, которому наиболее подвержены профили с отбортовками [19, 27].

Потеря устойчивости и разрыв периферийного элемента (рис. 1.46) возникают из-за ошибок в схемах формовки и выборе условий замыкания калибров [48]. Данное явление весьма опасно, поскольку возможен захват кромки торцевыми поверхностями буртов роликов, приводящий к разрыву заготовки и явлению задира посадочных поверхностей буртов [77].

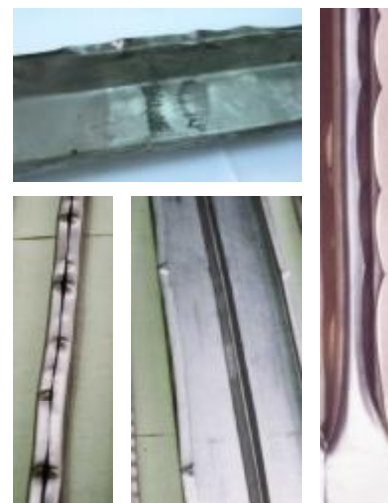


Рис. 1.45. Излом полок

Хлопуны (рис. 1.47) могут возникать на донной части и стенках профиля. В донной части профиля хлопуны возникают вследствие превышения предельных углов подгибки при режиме формовки с жесткой угловой зоной. На стенках хлопуны могут возникать при формообразовании профилей с жесткими краевыми элементами (отбортовками, элементами двойной толщины, петельными элементами) или при «подсадке» заготовки. В ряде случаев причиной возникновения хлопунов служат некомпенсированные в пластической области сжимающие напряжения [27]. По ГОСТ 30245-94 высота хлопунов не должна превышать 1 % от величины харак-

терного размера поперечного сечения профиля (по DIN 59413 – не более $\pm 0,3$ мм) [77].

Неустойчивость при осадке криволинейного элемента может сопровождаться обратным остаточным прогибом. Иногда применяют так называемую «подсадку» заготовки за счет сжатия подгибаемой полки поперек посредством воздействия на периферийные элементы жесткости. В обоих случаях имеют место отклонения от плоскостности элементов профиля, которые регламентируются по правилам, применяемым к хлопунам. [24, 27].



Рис. 1.46. Потеря устойчивости и разрыв периферийного элемента

Мелкие поперечные гофры вблизи элементов жесткости возникают преимущественно в донной части профиля у основания рифтов или угловых зон (рис. 1.48) из-за осадки хлопун. Заниженное межклетьевого расстояния станка может также служить причиной возникновения данного дефекта.

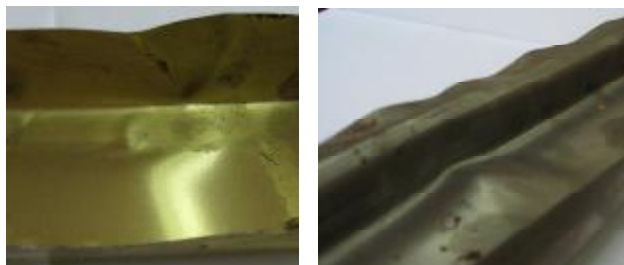


Рис. 1.47. Хлопуны

Общая потеря устойчивости заготовки в межклетьевом пространстве имеет место при больших отношениях межклетьевого расстояния к размерам поперечного сечения профиля (порядка 30 – 40). Этот вид потери устойчивости проявляется в виде излома краевых подгибаемых элементов и «складывания» заготовки. Способы предотвращения дефекта: применение межклетьевых проводок; использование станков с малым межклетьевым расстоянием; смягчение режимов подгибки полок; обеспечение переднего натяга заготовки [79, 19].

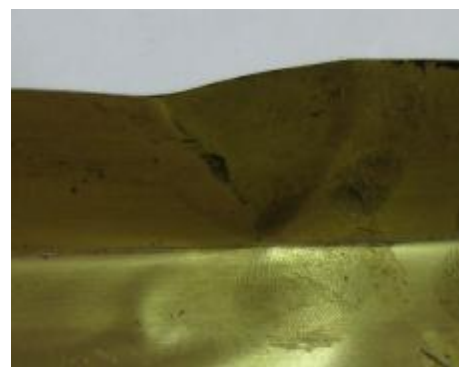


Рис. 1.48. Мелкие гофры вблизи угловой зоны профиля

Одной из важных задач работы являлась выработка мер, направленных на предотвращение вышеуказанных дефектов заготовок, обеспечение высокого качества, а также сокращение затрат на стадии разработки и внедрения технологий производства гнутых полужакрытых профилей. Решению этой задачи

способствовало изучение предшествующего опыта разработчиков технологий профилирования и исследований в этой области (см. разделы 1.7 и 1.8).

1.7. Анализ процессов формообразования полузакрытых профилей

Предупреждение дефектов заготовок при производстве полузакрытых профилей в роликах существенно зависит от принятой схемы формообразования в зависимости от типоразмера профиля, наличия и вида покрытия, а также вида и размеров элементов жесткости [51, 27]. Схема формообразования определяет конфигурацию роликовых калибров и является важнейшим фактором технологического процесса. Напомним, что к разряду полузакрытых профилей будем относить те профили, формовка которых хотя бы в одной из пар валков осуществляется в условиях одностороннего доступа инструмента к поверхности заготовки. Часто наличие элементов жесткости является достаточным признаком отнесения профиля к разряду полузакрытых (рис. 1.49). Рассмотрим схемы формообразования полузакрытых профилей в порядке возрастания их сложности.

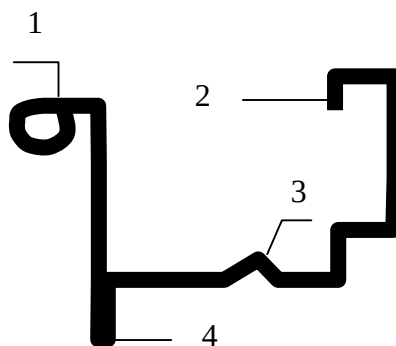


Рис. 1.49. Профиль с элементами жесткости:
1 – петельный элемент;
2 – отбортовка;
3 – рифт;
4 – элемент двойной толщины

С-образные профили. При их формообразовании заготовка подвержена дефектам формы и размеров, что связано со свободным положением периферийных элементов в калибрах из-за отсутствия доступа инструмента в «мертвую зону» формообразования. В табл. 1.10 сведены признаки основных известных схем формообразования профилей данного типа, относящихся в основном к традиционному профилированию.

Специфичным признаком технологии ТП полузакрытых и замкнутых профилей, реализуемой обычно за 10 – 20 переходов, является сжатие профиля в валках последних переходов [89 – 91] и применение специальных приемов для устранения деформации стенок и кромок. В МИД применяют закрытые калибры на всех переходах, а на последних переходах используют подсадку заготовки [19, 27]. При этом ограничиваются применением горизонтальных роликов и лишь в весьма сложных случаях – межклетьевых проводок.

Таблица 1.10

Патентованные технические решения производства С-образных профилей

№	Техническое решение	Решаемые задачи	Недостатки	Примечания
1	Выдерживание заданного расстояния между центрами кривизны зон изгиба, примыкающих к боковым стенкам	Повышение точности формовки профиля с $S = 0,5 - 1$ мм	Переформовка заготовки, лишние энергозатраты, износ роликов, нарушение покрытия	[80]
2	Горизонтальные полки подгибают на угол $24...33^\circ$ относительно боковых полок. Радиусы изгиба 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	Снижение числа переходов и повышение точности	Реализация способа требует межклетевых проводок: назначение углов подгибки более 10° на последних переходах вызывает кромковую волнистость	[81]
3	Перегиб полок до достижения расстояния между кромками, равного заданному на готовом профиле, а затем осуществляют разгибку боковых стенок, воздействуя на них через места сопряжения их с полками	Повышение точности	При широких горизонтальных полках требует увеличения заявленного в способе числа клеток почти в два раза	[82] Профиль из Ст3 размером $80 \times 40 \times 15 \times 2,5$ мм за шесть переходов
4	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 защемяют вершину гофра валками	Уменьшение числа переходов	Ограничение по высоте профиля. На профилях толщиной до $0,8$ мм у основания рифта могут появляться мелкие гофры или линии Чернова – Людерса	[83] Профиль с гофром жесткости в донной части. Формовка за 13 переходов
5	Последовательная формовка рифтов на предварительных переходах; периферийные участки стенки отгибают на угол φ с одновременной подгибкой боковых стенок и полок, причем угол φ определяют из неравенства: $b_c \cdot \cos(90^\circ - \varphi) - b_n \cdot \sin(90^\circ - \varphi) \geq R_0$, где b_c , b_n – ширина боковой стенки и полки соответственно, мм; R_0 – радиус сопряжения дна и стенки	Уменьшение пружинения на предварительных переходах	Ограниченные технологические возможности при формовке профилей с широкими горизонтальными полками или при расположении рифтов в непосредственной близости зон изгиба	[84]

№	Техническое решение	Решаемые задачи	Недостатки	Примечания
	профиля, мм.			
6	Формовка технологического гофра на стенке с одновременной фиксацией кромок полок, последующая отгибка боковых стенок профиля и выпрямление технологического гофра с обеспечением подгибки боковых стенок на заданный угол	Стабилизация расстояния между полками	Упругая отдача при выпрямлении гофра, усложнение технологического оснащения	[85] Формовка за 11 переходов
7	Формообразование С-образного профиля с наклонными полками предусматривает предварительную подгибку краевых участков на 90°, последующую подгибку полок и разгибку краевых элементов, а в последнем переходе – осадку полок с удержанием кромок	Повышение точности и уменьшение числа переходов	Потеря устойчивости полок и нарушение покрытия на торцах и местах изгиба между стенками и полками	[86] Профиль 8х11,5х0,7 мм из оцинкованной стали 08пс с полимерным покрытием; скорость профилирования – 20 м/мин; за восемь переходов
8	Свертка заготовки плавных промежуточных форм в трубу с торцевым поджатием	Уменьшение числа переходов	Ограничения в изготовлении тонкостенных профилей	[87]
9	Боковое обжатие в вертикальных роликах и последующая осадка в горизонтальных	Уменьшение пружинения	Требуется дополнительный переход для калибровки; способ неприменим для формовки тонкостенных профилей	[88]

Зетовые профили. Продольная кривизна и скрутка являются основными проблемами при формообразовании зетовых профилей, отягощенных элементами жесткости [51]. На рис. 1.50 представлена сокращенная номенклатура зетовых профилей, формируемых по полузакрытой схеме. В табл. 1.11 сведены признаки основных известных схем формообразования зетовых профилей без элементов жесткости, которые могут быть учтены при разработке технологии МИД для формовки профилей с элементами жесткости.

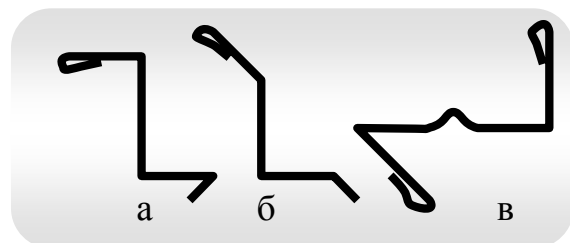


Рис. 1.50. Полузакрытые зетовые профили

Таблица 1.11

Технические решения, используемые при производстве зетовых профилей

№	Техническое решение	Решаемые задачи	Недостатки	Примечания
1	Уменьшение 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. При этом зона сгиба одной полки и торец другой находятся на одной горизонтальной линии во всех переходах	Повышение качества равнополочного профиля и стойкости валков	Большое число переходов и возможная неплоскостность стенки вследствие эффекта пружинения	[92] Профиль 120x60x4 мм. Восемь переходов, улучшение качества поверхности, сокращение энергозатрат на 5...10 %. Скрутка – менее 0,7 град/м
2	Подгибку полок осуществляют на разные конечные углы: 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, причем центры тяжести сечения профиля по переходам располагают в одной плоскости	Уменьшение винтообразного скручивания	Большое число переходов	[93] Профиль 130x80x80x4 мм с углами подгибки полок 60° из стали 09Г2 формируется за 9 переходов
3	При изготовлении неравнополочных зетовых профилей на 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	Предотвращение скручивания и продольного изгиба	Ограниченные возможности: при относительной ширине подгибаемых полок более 20 – кромковая волнистость и скрутка более 2° на 1 м длины	[94] Профиль 80x75x35x4 мм из материала сталь 09Г2 за семь переходов. Скручивание менее 0,5° на 1 м длины; продольный изгиб устранялся полностью
4	При изготовлении неравнополочного профиля заготовку в первый калибр подают под углом α , а в последующих калибрах на этот же угол по отношению к горизонтали на-	Снижение числа переходов	Большое число переходов (при использовании МИД требуется 5 – 6 переходов)	[95] Профиль 20x30x40x1 мм за 8 переходов. Межклетьевое

№	Техническое решение	Решаемые задачи	Недостатки	Примечания
	клоняют среднюю часть поперечного сечения заготовки. Причем полки подгибают на равные углы: большую вверх, а нижнюю – вниз при расположении зоны изгиба, примыкающей к большей полке, на одной прямой, параллельной оси профилирования			расстояние – 300 мм. Режим подгибки: 0-10-20-34-50-66-80-88-90°. Скрутка – не более 1° на 1 метр длины, объем брака – менее 0,3 %.

В способе изготовления профиля (рис. 1.50,а), с целью предотвращения скрутки и уменьшения числа переходов, на предварительных переходах формуют элемент двойной толщины и отбортовку одновременно, а на последних переходах формуют обе полки, причем, угол подгибки полки с элементом двойной толщины относительно горизонтали принимают равным углу подгибки стенки и другой полки, прилегающей к отбортовке (рис. 1.51) [96]. Данная схема близка к схеме интенсивного деформирования, однако с некоторым отличием по раскладу углов подгибки.

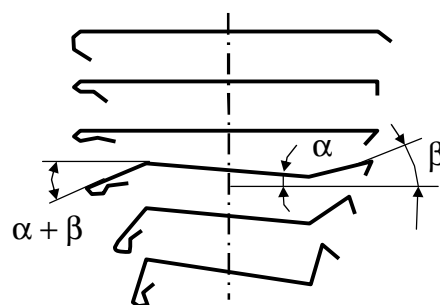


Рис. 1.51. Формовка профиля с элементом двойной толщины и отбортовкой

При производстве профиля (рис. 1.50,б) применяют способ [97], где предупреждение винтообразного скручивания достигается тем, что сначала

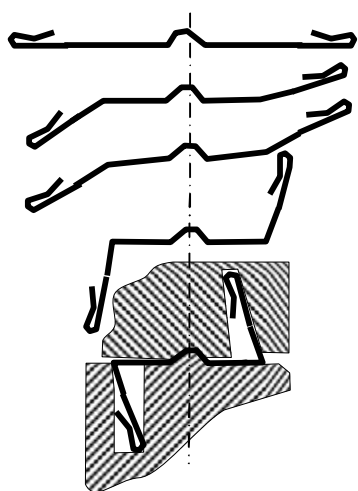


Рис. 1.53. Схема формообразования профиля по способу [98]

подгибают отбортовку на 45 – 60° одновременно с формовкой ЭДТ. Затем производят формовку полки, прилегающей к ЭДТ, и окончательную формовку отбортовки (рис. 1.52), а в последних переходах осуществляют окончательную формовку всех элементов, выдерживая при этом вершины крайних углов профиля на одном уровне. Способ реализуется за 15 переходов со скоростью профилирования 30 м/мин. Недостаток способа – увеличение скрутки с увеличением ширины полок и наличие перегиба для уменьшения пружинения.

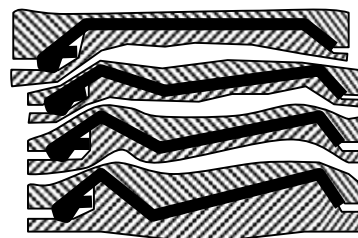


Рис. 1.52. Схема формовки профиля на средних переходах в способе [97]

В способе [98] изготовления профиля (см. рис. 1.50,в) сначала формуют элементы двойной толщины и центральный рифт. Затем производят подгибку полок с приложением противоскручивающих сил по биссектрисам углов до окончательной конфигурации профиля, фиксируя по рифту профиль в валках, а на последних переходах осуществляют его правку поворотом в сторону, противоположную скручиванию, с приложением аксиальных растягивающих сил (рис. 1.53). По данному способу формовали профиль из заготовки 0,6х94 мм за 10 основных и 8 промежуточных переходов со скоростью профилирования 30 м/мин. Аксиальная сила создавалась приращением диаметров роликов. Скрутка находилась в пределах 1 град/м при неплоскостности полок менее 1,5 мм по длине детали 1205 мм. Недостаток способа – большое число переходов.

Аксиальное растяжение в действительности оказывается эффективной мерой не только для стабилизации размерных параметров, но и для снижения уровня остаточных напряжений, что также применяется в МИД [79, 27].

Профили с элементами двойной толщины (ЭДТ) формуют по различным схемам в зависимости от топологии этих элементов и их размеров (рис. 1.54) [99]. В этом случае обеспечение качества осложняется необходимостью сохранности покрытия и обеспечения плотного взаимного прилегания элементов двойной толщины [100, 101].

В способе [102] изготовления несимметричных профилей с ЭДТ на периферийных участках (см. рис. 1.54-а) сначала формуют ЭДТ, а затем сечению заготовки придают конфигурацию, у которой центры тяжести масс частей сечений по обе стороны от вертикальной оси, проходящей через центр сечения, размещены на одной прямой, лежащей в плоскости профилирования (рис. 1.55). Цель изобретения – предупреждение нарушения покрытия, скрутки и продольного прогиба. По сравнению с прототипом получено снижение скрутки с $1^{\circ}30'$ до $0^{\circ}50'$, а продольного прогиба – с 2 мм/м до 1,0

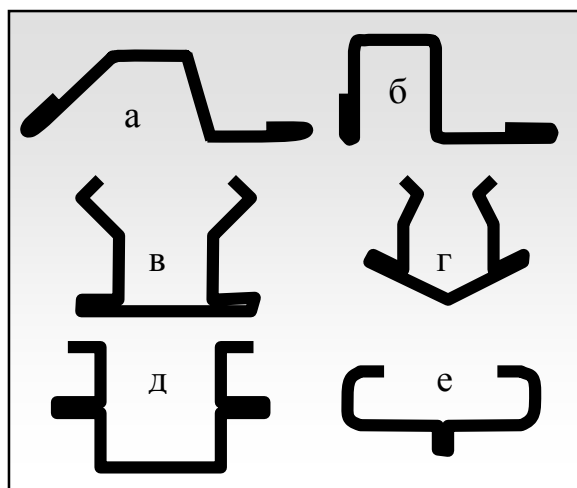


Рис. 1.54. Профили с элементами двойной толщины: а) – периферийными наклонными и горизонтальными; б) – периферийными вертикальными и горизонтальными; в) – угловыми горизонтальными; г) – угловыми наклонными; д) – на подгибаемых полках; е) – на базовом элементе (дне) профиля

мм/м. Недостаток способа – большое число переходов.

В способе [103] для предупреждения продольного прогиба сдвоенных полок профиля (рис. 1.54,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 (рис. 1.56). Недостаток способа – необходимость применения межклетьевых проводок.

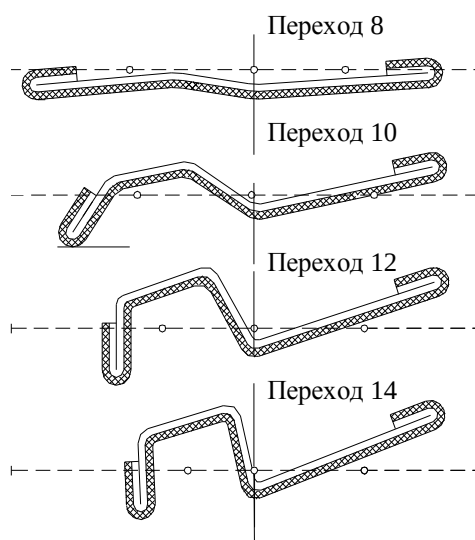


Рис. 1.55. Изготовление профиля из заготовки 145x1,2 мм

В способе изготовления профиля (рис.1.54,г) с габаритами сечения 34x22 мм [104] исключение нарушения сплошности покрытия и уменьшение количества технологических переходов достигается тем, что места изгиба элементов полок двойной толщины сначала отформовывают по дугам больших радиусов, а в последующих переходах эти радиусы постепенно уменьшают; после отформовки V – образных отгибов у кромок обжимают нормальными силами стенки профиля, а подгибку их до вертикального положения осуществляют после обжима, при этом осадку полок осуществляют вертикальными усилиями с ограничениями ширины профиля (рис. 1.57). Способ реализуется за 11 переходов. Недостаток способа – избыточность по числу предварительных переходов.

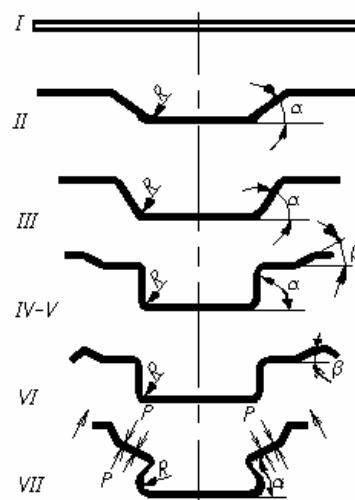


Рис. 1.56. Схема формовки профиля по способу работы [103]

В способе [105] экономия металла и повышение размерной точности профилей с покрытием толщиной 0,7 мм достигаются формовкой продольных технологических гофров в местах будущих элементов двойной толщины на заданную высоту с последующей обрезкой кромок при этой же высоте упомянутых гофров. Затем осуществляют доформовку продольных гофров в элементы двойной толщины и подгибку полок и боковых стенок с отформованными ЭДТ (рис. 1.58). Отклонения ширины полок готового профиля составляли +0,5 – 0,8

мм (в прототипе – $\pm 1,2$ мм) при потере металла 0,18 % (против 5,5 % по способу прототипа).

В способе [106] производства С-образных профилей с ЭДТ в донной части (рис. 1.54-е), для снижения утонения и степени упрочнения материала в местах изгиба, ширину изгибаемых участков профиля в предыдущих проходах выдерживают больше ширины их развертки в последующих проходах и на готовом профиле. Профиль 120х20х10х2 мм изготавливают за 10 переходов с первоначальной шириной участка заготовки под ЭДТ 40 мм и ее последующим уменьшением до 28 мм. Недостатки схемы – избыточное число переходов и возможность излома полок с отбортовками из-за боковой утяжки, связанной с

формовкой ЭДТ.

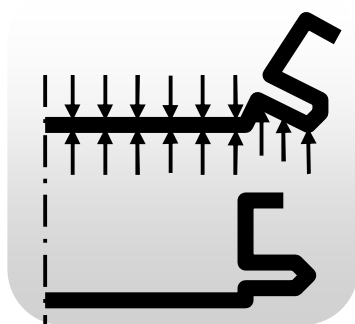


Рис. 1.58. Схема формовки профиля по способу [105]

Обзор способов изготовления профилей с ЭДТ показывает, что цели их применения разнообразны: предотвращение утонения, скрутки, прогибов, обеспечение плоскостности и размерных параметров сечения, однако для МИД наиболее актуальными задачами являются уменьшение числа переходов, предотвращение потери устойчивости элементов и повреждения покрытия [27, 4].

1.8. Теоретический анализ процессов профилирования

Основой для теоретической разработки процессов формообразования полужакрытых профилей являются классические работы Ю.М. Арышенского и Ф.В. Гречникова [69, 107], К.Н. Богоявленского [108], С.И. Вдовина [109, 110], Г.Я. Гуна [111], В.И. Давыдова и М.П. Максакова [40], М.Е. Докторов и И.С. Тришевского [42], В.И. Ершова [37], Д. Кокадо и Е. Онода [112], И.М. Колганова [36, 35], В.В. Колмогорова [113], А.Д. Матвеева [114, 115], Е.А. Попова и М.В. Сторожева [116], Г.В. Проскуракова [47], Ю.Н. Работнова [117], И.П. Ренне [118], В.В. Соколовского [119], Х. Судзуки и М. Киути [120], Р. Хилла [121]. В них рассмотрены основные вопросы гибки: НДС и утонение заготовки в зоне изгиба, различные формулировки условий пластичности и учет упрочнения,

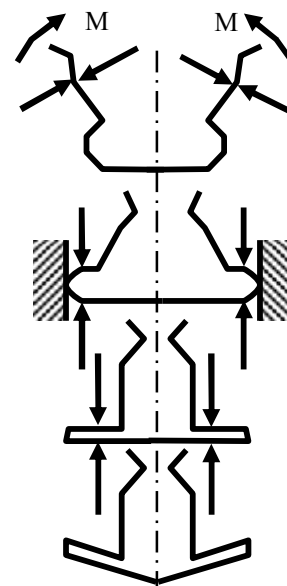


Рис. 1.57. Схема формовки по способу [104]

влияние анизотропии на процессы гибки, пружинение, предельные возможности процесса гибки, вопросы устойчивости при изгибе заготовки.

НДС угловой зоны рассматривается в работах [118, 121, 108, 109, 42, 114, 119, 37] (без или) с учетом различных факторов (упрочнения, анизотропии) для случая изгиба моментом. В работе [42] при гибке в валках учитывают скорость профилирования. Более подробно эти работы обсуждаются в монографии [27].

Изменение толщины заготовки в работе [121] определяется на основе равенства площадей зоны сжатия и зоны растяжения. Изгиб с упрощенным условием пластичности был рассмотрен в статье [114], где показано, что изменение толщины заготовки не зависит от пластических свойств материала, а определяется уравнениями движения. В работе [119] утонение определяется для случая гибки с растяжением, а в работах [37, 69, 27] – с торцевым сжатием.

Упрочнение при гибке листовых материалов оказывает существенное влияние на технологический процесс и его предельные возможности [116, 108, 27]. При одновременном действии тангенциального напряжения σ_t и изгиба моментом при степенном упрочнении утонение полосы быстро растет и при $\sigma_t = (0,15...0,25)\sigma_s$ достигает значений такого же порядка, как и наблюдаемых в практике профилирования (15 – 18 %)[108]. На основе ПФЭ 2³ определено утонение и деформирующая сила при профилировании.

Упрочнение существенно влияет на силовые параметры формирования уголковой зоны, пружинение и параметры предельного формоизменения, что надлежит принимать во внимание при разработке технологии. При вычислении деформаций подгибаемых элементов профиля упрочнением можно пренебречь, поскольку эти деформации обычно незначительны [27].

Анизотропные свойства заготовок при гибке учтены в работах [107, 67, 27], где показано их существенное влияние на силовые параметры процессов гибки и предельные возможности последних. В работе [107] показано, что при относительном сужении $\psi = 0,3$ и значениях коэффициентов анизотропии около 0,8 допустимый относительный радиус изгиба составляет 4,1, а при коэффициентах анизотропии порядка 0,3 он равен 1,2. Однако в отличие от других операций листовой штамповки, где раскрой материала возможен под произвольным углом, при профилировании раскрой материала однозначно определен, а желаемый вид анизотропии может быть сформирован лишь на стадии производства листового проката [69].

Предельные возможности при гибке определяются допустимой деформацией наружного растянутого волокна [40, 42, 37, 116, 121, 27] в случае гибки моментом или гибки с растяжением. При торцевом поджатии предельные возможности устанавливаются по условию потери устойчивости заготовки (локальному выпучиванию полки или появлению зажимов на внутреннем контуре зоны изгиба).

Пружинение при гибке достаточно хорошо изучено [107, 108, 40, 42, 37, 116, 121, 27, 122, 123]. Для процесса интенсивного формообразования профилей открытого типа в роликах вопрос пружинения решен в работе [124], а для полузакрытых профилей этот вопрос остается открытым.

Поведение заготовки в межклетьевом пространстве при профилировании имеет большое значение для обеспечения устойчивости процесса и надлежащего качества профиля. Протяженность зоны плавного перехода связана с потерей устойчивости заготовки. В работе [125] показано, 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. В случае, если межклетьевое расстояние меньше протяженности зоны плавного перехода, то происходит переформовка заготовки, связанная с неоправданными энергетическими затратами, а также ухудшающая условия формообразования [27]. Поэтому определение протяженности зоны плавного перехода важно не только для разработки технологии, но и для проектирования профилировочного оборудования [19, 27].

Углы подгибки и деформации полок в ТП назначаются эмпирически в пределах от 6° до 15°, а предельный угол за переход дается формулой [40]:

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

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

Расчет по этой формуле затруднен из-за неопределенности допустимой деформации, приводящей к потере устойчивости полки.

В работе [42] углы подгибки определены в диапазоне 8÷12°, а предельные углы за переход – в пределах 15÷18° практически для всех видов материалов и толщин заготовки. Продольные деформации полок определяют геометрически с учетом продольного изгиба профиля с помощью коэффициента k :

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

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

Схемы формовки с постоянным и переменным радиусом по переходам рассмотрены в работе [126], где приводятся выражения для расчета продольных деформаций полок с учетом изменения их ширины ввиду изменения размеров угловой зоны. В ТП при режиме подгибки 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 % [44]. В работе [42] установлено, что потеря устойчивости полки является следствием продольных пластических деформаций, которые зависят от углов подгибки за переход, ширины полки и толщины материала заготовки.

В МИД [44, 46] назначение углов подгибки при изготовлении полузакрытых профилей должно базироваться на тщательных исследованиях, позволяющих уменьшить число переходов при надлежащем качестве профиля.

Потеря устойчивости элементов заготовки, в том числе при профилировании, рассматривается в работах [117, 40, 41, 42, 44, 107, 108, 75, 76, 78, 19, 27]. Классические решения задач устойчивости в закритической области часто далеки от реалий технологии профилирования из-за несоответствия исходных посылок теории и реальных объектов, а также ввиду специфики нагружения. Поэтому иногда применяют инженерную теорию устойчивости пластического деформирования, основанную на приближенных критериях [127]. В работе [112] вопрос возникновения кромковой волнистости желобчатых профилей с фланцами в зависимости от вертикального и бокового углов захода профиля калибр увязывается с двумя факторами: отношением ширины заготовки к ширине профиля и отношением высоты профиля к ширине проема калибра. Работа не дает обобщения результатов на другие типоразмеры профилей.

В последние десятилетия широко используется метод конечных элементов (МКЭ) для решения задач формообразования [128], в том числе и для расчета процессов профилирования [129, 3]. Однако при применении МКЭ, кроме технических проблем (бифуркации, расходимость, вырождение элементов), существуют и другие проблемы: высокая стоимость их приобретения и эксплуатации, малая окупаемость для небольших фирм и их ориентация на ТП.

Тем не менее, универсальные программы являются действенным инструментом верификации аналитических моделей процессов профилирования [27].

Результаты последних исследований устойчивости при профилировании приведены в работах [77, 78, 42, 27], что можно применить в технологии изготовления полужакрытых профилей. Формулировка условий устойчивости деформирования при интенсивном деформировании должна учитывать ряд ограничений технологического процесса, в частности, число переходов.

Число переходов при профилировании обычно определяют на основании предшествующего опыта разработчиков и часто лишь указывают широкий диапазон значений для профилей определенного типа [108, 40 – 43, 37], что осложняет формализацию проектирования технологической оснастки [130, 27]. В одной из публикаций немецкого автора говорится что, «для изготовления уголков требуется 3 – 5 пар роликов, швеллеров – 4 – 7, корытообразных профилей – 6 – 10» без указания условий их формообразования, размеров сечения и применяемого материала заготовок [27]. Примерно в 1,5 раза большие значения числа переходов дает справочник [41]. Другие данные, относящиеся к формализации определения числа переходов, приведены в разделе 1.3 настоящей работы. Определение числа переходов при изготовлении МИД полужакрытых профилей с рифтами в донной части является особо актуальной задачей.

Выводы

1. Анализ разработанного классификатора применения гнутых полужакрытых профилей и частных случаев их использования позволил установить, что в российском автомобилестроении применяется более сотни типоразмеров полужакрытых профилей (модели «ВАЗ» – около 20, УАЗ – около 30); в строительстве и других отраслях их номенклатура насчитывает многие сотни. Показано, что эффективность применения полужакрытых профилей на 10 – 30 % выше по сравнению с применением фасонных профилей.

2. Выявлено, что для мелкосерийного производства полужакрытых профилей с технологической и экономической точек зрения предпочтительным (по сравнению с гибкой в кромкогибочных устройствах, штампах, инструментальных фильерах и комбинированным методом) является профилирование благодаря его широким технологическим возможностям, малым отходам металла (1 – 2 %), высокому качеству поверхности и точности сечения профиля, возможности автоматизации технологического процесса.

3. Из методов изготовления гнутых полузакрытых профилей в роликах МИД является более предпочтительным по сравнению с СИ и ТП в связи с его широкими технологическими возможностями и высокой эффективностью.

4. Из-за отсутствия классификаторов профилировочного оборудования осложняется его выбор для условий конкретного производства. Применение оборудования для ТП нецелесообразно для условий мелкосерийного изготовления профилей из-за высокой стоимости, значительных габаритных размеров, большого количества оснастки, а разработка нового оборудования для производства полузакрытых профилей требует создания моделей для расчета оптимальных межклетьевых расстояний, числа переходов, а также создания эффективного устройства для правки профилей.

5. Широкое применение материалов с покрытием, подверженным повреждению при профилировании, анализ разработанного классификатора дефектов и причин их возникновения при отработке технологии требуют исследования процессов формообразования и выработки на его основе эффективных мер, направленных на совершенствование технологии и повышение качества гнутых полузакрытых профилей.

6. Анализ процессов производства С-образных, зетовых и специальных профилей с элементами жесткости показал, что технические решения в более чем 20 патентах направлены на предотвращение дефектов формы и размеров, нарушения покрытия и в особенности на предотвращение потери устойчивости элементов профиля. Выявлены технические решения, подлежащие использованию при производстве МИД гнутых полузакрытых профилей.

7. Изучение теоретических работ и практика использования МИД в производстве полузакрытых профилей выявили необходимость исследования НДС угловой зоны для расчета ширины заготовки и пружинения, определения протяженности зоны плавного перехода для оптимизации схем формообразования и расчетов оборудования, НДС подгибаемых полок, углов подгибки по переходам и числа переходов для формулировки условий потери устойчивости заготовки, размерной точности сечения профиля и др. Отсутствие указанных моделей и разработок по созданию соответствующего оборудования сдерживает широкое внедрение МИД для производства гнутых полузакрытых профилей.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРЕДПРИНЯТЫХ АВТОРАМИ

Выполненный анализ патентной и технической литературы показал, что вопросам разработки и совершенствования технологии производства методом интенсивного деформирования многоэлементных полузакрытых профилей, а также средств реализации такой технологии в условиях мелкосерийного производства на момент начала исследований авторами книги не уделялось достаточного внимания.

Поэтому для достижения указанной во введении книги цели были поставлены следующие задачи:

- разработать классификатор полузакрытых профилей, классификатор дефектов полузакрытых профилей и заготовок, классификатор профилировочных станков;
- разработать математические модели формообразования угловых зон на предварительных и окончательных переходах, формовки рифтов в донной части профиля, поведения заготовки в межклетьевом пространстве и устойчивости формообразования заготовки;
- провести экспериментальные исследования, включающие исследование зон изгиба заготовок при растяжении и подсадке, формовки рифтов, протяженности зон плавного перехода, влияния элементов жесткости, устойчивости заготовок при формообразовании профиля с целью верификации разработанных математических моделей;
- создать на основе проведенных исследований процедуры разработки технологии изготовления МИД полузакрытых профилей и выработать рекомендации, направленные на снижение затрат проектирования, отработки технологии и повышение качества полузакрытых профилей;
- совершенствовать профилировочное и вспомогательное оборудование для производства полузакрытых профилей;
- внедрить технологию и оборудование на промышленных предприятиях нескольких отраслей промышленности.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ В РОЛИКАХ

В разделе 1.6 были рассмотрены основные дефекты заготовки при обработке технологии изготовления полузакрытых профилей МИД, основными из которых являются кромковая волнистость, боковое выпучивание, смятие и разрыв заготовки, излом полок и хлопунцы, возникающие в 60 – 70 % случаев. Причинами этих дефектов часто является изменение ширины заготовки из-за изменения параметров угловой зоны или рифтов в донной части профиля в процессе формообразования, ошибки в выборе углов подгибки элементов профиля, приводящие к увеличению протяженности зон плавного перехода, или заниженное число переходов. Эти вопросы рассматриваются в данном разделе книги. Типоразмер профиля и элементы жесткости во многом определяют возможность появления того или иного из указанных дефектов, поэтому классификация полузакрытых профилей необходима для совершенствования технологии изготовления полузакрытых профилей, выработки рекомендаций по их производству и уточнения предмета исследования.

2.1. Классификация полузакрытых профилей [131]

Рынок профильной продукции в последние годы приобретает уклон в сторону расширения номенклатуры многоэлементных профилей полузакрытого типа. Между тем, до настоящего времени отсутствовали публикации, посвященные классификации и систематизации таких профилей,

Понятие «полузакрытый профиль» могло бы быть сформулировано в терминах геометрических характеристик профиля, например, по признаку расположения точек концевых элементов в окаймляющем многоугольнике сечения профиля или по признаку принадлежности проекций этих точек базовому элементу (подверженному наименьшей деформации) при вертикальном проецировании (рис. 2.1). Однако эти определения неоднозначны, поскольку окаймляющих многоугольников можно построить бесконечное множество для каждой конфигурации (ср. схемы «а», «б» и «в» на рис. 2.1), а проекции концевых точек могут располагаться по отношению к базовому элементу по-разному: одна может ему принадлежать, а другая – нет (рис. 2.1,б). Однако тот и другой формуруются по закрытой схеме (за вычетом срединного участка). **Полузакрытым** будем называть профиль, при изготовлении которого в горизонтальных парах роликов к некоторым формуемым эле-

ментам (или хотя бы к одному из них) отсутствует двусторонний доступ инструмента (см. рис. 2.1,г) хотя бы на одном из технологических переходов.

Классификация профилей полузакрытого типа осуществляется по следующим первичным параметрам: 1) наличие/отсутствие симметрии сечения профиля относительно вертикальной плоскости; 2) наличие/отсутствие элементов жесткости; 3) толщина профиля; 4) наличие/отсутствие перфорации; 5) пластичность материала; 6) наличие/отсутствие покрытия. Существует и ряд вторичных параметров классификации (рис. 2.2), которые учитывают особенности формообразования.

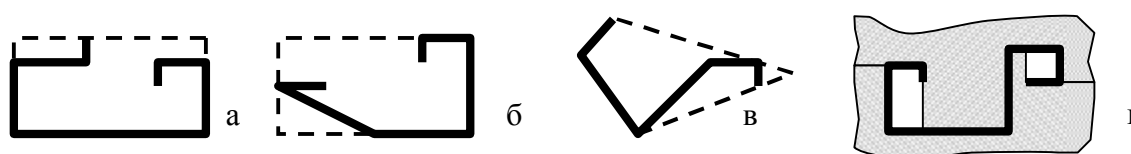


Рис. 2.1. К понятию «полузакрытого профиля»

В классификаторе первые три первичных параметра в целом отражают геометрические соотношения сечения профиля, а последние три первичных параметра можно было бы условно отнести к характеристикам технологического плана. Дело заключается в том, что профили, имеющие совершенно идентичные характеристики по первым трем параметрам классификации, но отличающиеся по характеристикам оставшихся параметров классификации могут потребовать различных технологических приемов для их изготовления (отличающихся друг от друга схемами и режимами формообразования). Следовательно, классификатор относится к категории конструктивно-технологических [131].

При рассмотрении симметрии сечения (блоки 1.1 и 1.2) учитывались особенности реализации процесса формовки профиля, связанные как с одинаковыми условиями формообразования периферийных элементов, так и с возможностью унификации конструктивных элементов технологического оснащения, например, замыкающих элементов калибра [48]. Выделенные параметры классификации, относящиеся к высоте различных участков профиля (преимущественно правой и левой сторон), оказывают влияние на возникновение скрутки и потери устойчивости элементов профиля. Кроме того, требуются различные технологические приемы для достижения одних и тех же характеристик точности по элементам, различающимся геометрическими характеристиками.

Наличие элементов жесткости (блоки 2.1 и 2.2), тип элемента, его размер, топология оказывают серьезное влияние на процесс формообразования [51] профиля. Здесь приняты типовые элементы жесткости согласно работе [51].

Классификация профилей по толщине стенки (блоки 3.1 – 3.3) подразумевает, что «умеренная толщина» соответствует толщине от 1,5 до 3,0 мм, «тонкостенный» профиль – профиль с толщиной стенки от 0,6 до 1,5 мм, «особо тонкостенный» профиль – профиль с толщиной стенки до 0,6 мм. Такое разделение обусловлено рядом явлений технологического плана, возникающих при работе с материалами различной толщины. Например, весьма зависимы от толщины материала такие явления как потеря устойчивости элементов, нарушение покрытия, деформация отверстий в перфорированных профилях, пружинение элементов. В чисто технологическом аспекте толщина сказывается и на применении межклетевых проводок и различного вида оправок.

Перфорация (блоки 4.1 и 4.2) выступает, с одной стороны, как бы конструктивным признаком, а с другой стороны, она тесно связана с технологией изготовления профиля. Профиль с перфорацией может быть изготовлен из предварительно перфорированной заготовки, из цельной заготовки с ее перфорацией в роликах по ходу процесса формообразования сечения профиля, или же из цельной заготовки с последующей перфорацией после формовки в роликах. Наличие ослабляющих отверстий в заготовке требует иной схемы формообразования по сравнению со схемой формообразования профиля идентичного сечения, производимого из цельной заготовки. В классификаторе отражены только случаи использования цельной и предварительно перфорированной заготовки как типичные для сложившихся проектных процедур реализации МИД.

Пластические свойства материала учтены в классификаторе блоками 5.1 – 5.3. Обоснованность включения данного показателя в классификатор очевидна, однако на практике реальная потребность в разделении материалов по свойствам пластичности при профилировании возникает не часто: в последние годы для целей профилирования в 95 – 97 % случаев применяют мягкие стали с различного вида покрытиями или без покрытий (см. раздел 1.5 книги). Обычно пластичность этих материалов по относительному удлинению находится в пределах 25 – 40 %, что считается приемлемым для про-

филирования. Конечно, технологии производства профилей из низкоуглеродистой стали и высокопрочных сплавов существенно различаются.

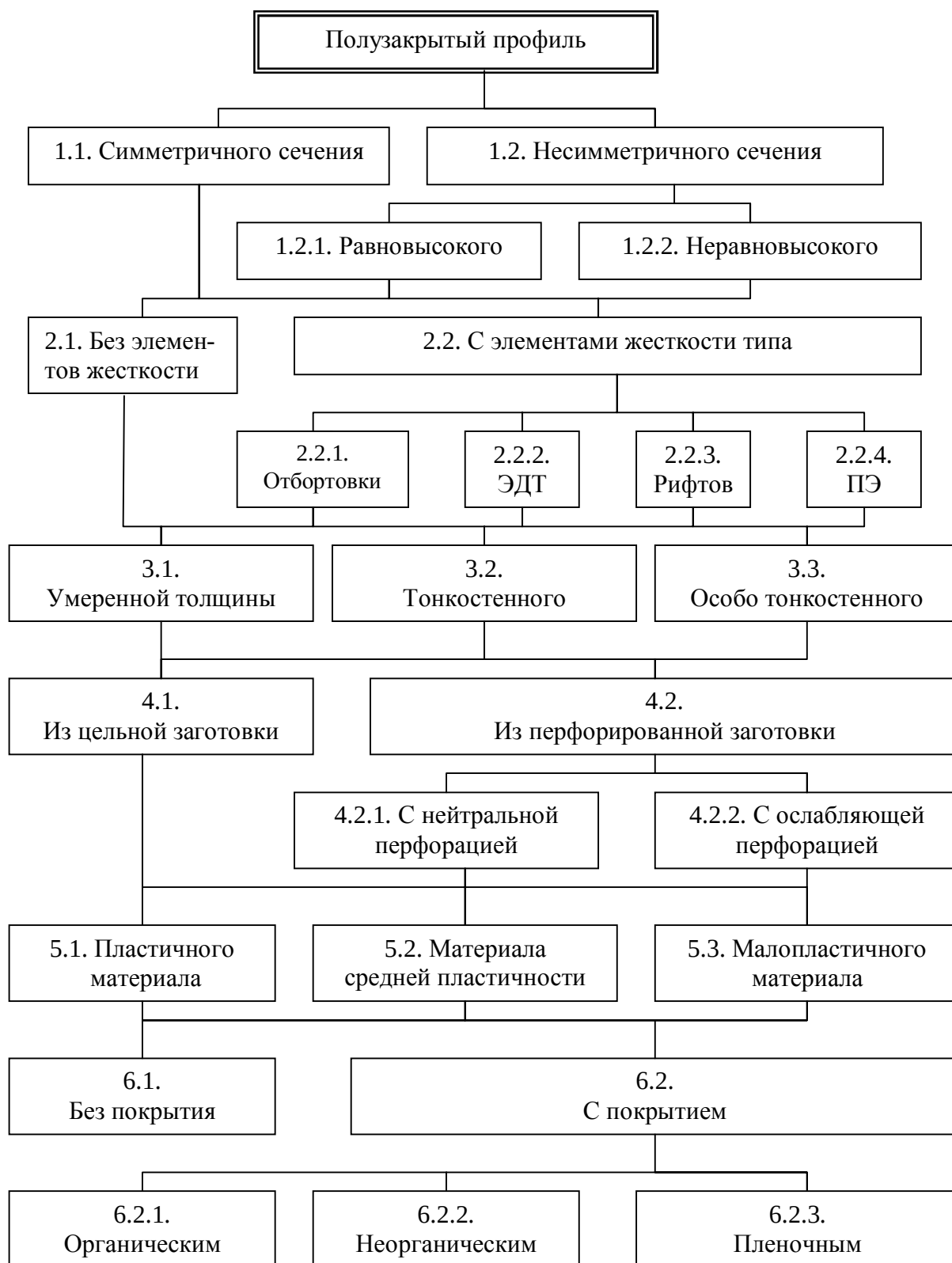


Рис. 2.2. Классификатор полужакрытых профилей

Наличие покрытия (блоки 6.1 и 6.2) на исходных заготовках часто приводит к требованию увеличения числа технологических переходов, особенно для заготовок умеренной толщины. Иногда для обеспечения сохранности покрытия приходится применять специальные проводки (например, торцевые проводки с полиуретановым покрытием, вводимые в разъем роликового калибра) [27].

Классификатор разработан на основе внедрения нескольких десятков типоразмеров полузакрытых профилей в ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ» (г. Ульяновск) и рекомендуется для использования при 1) оценке технологичности изготовления профиля; 2) типизации технологических приемов и проектных процедур; 3) создании автоматизированной системы технологической подготовки производства [131].

Таким образом, предметом последующих исследований была технология производства МИД полузакрытых профилей с типовыми элементами жесткости из цельных заготовок средней пластичности толщиной от 0,6 до 2,5 мм с органическим покрытием или без покрытия.

2.2. НДС в зонах изгиба при различном нагружении и ширина заготовки

Состояние материала в зоне изгиба, его изменение по переходам влияет на изменение ширины заготовки, что должно учитываться при проектировании оснастки, а также на условия устойчивости деформирования. При теоретическом анализе НДС в угловых зонах принимается схема плоской деформации, материал считается изотропным и несжимаемым, эффектом Баушингера пренебрегаем, компоненты тензора напряжений зависят только от одной из координат. Другие допущения формулируются по мере следования соответствующих задач.

Угловая зона на предварительных и окончательных переходах[132].

Особенностью МИД является одновременная формовка всех элементов профиля и значительное «ужесточение» режимов подгибки его элементов.

При ТП применяют преимущественно последовательную формовку, подгибая смыкающиеся полки до угла, близкого к окончательному ($82^\circ \dots 87^\circ$), а затем осуществляют подгибку боковых стенок. Недостатком этой схемы формовки является недогиб боковых стенок и различие в толщине и радиусах изгиба зон, примыкающих к смыкающимся полкам и к дну

профиля. Аналогичные проблемы возникают и при использовании МИД в случае ошибочного выбора ширины заготовки. Применение закрытых калибров требует точного задания ширины заготовки на стадии разработки технологического оснащения. Поэтому важной задачей является разработка модели, позволяющей производить расчет ширины заготовки с учетом знакопеременного изменения толщины заготовки в угловых зонах по переходам.

Расчет ширины заготовки основан на учете изменения длины элементов профиля. В общем случае ширина заготовки B_3 подсчитывается по формуле:

$$B_3 = \sum_{i=1}^5 B_i^r + \sum_{i=1}^4 B_i^c + \Delta B, \quad (2.1)$$

где B_i^r, B_i^c – протяженность прямолинейных и криволинейных участков развертки профиля соответственно; i – номер соответствующего участка; ΔB – приращение ширины заготовки.

Расчет по формуле (2.1) относится к средней линии развертки заготовки. Криволинейные участки средней линии представляют собой дуги окружностей, которые могут изменяться в процессе профилирования полосы. Это во многом зависит от принципа формовки: с переменным или постоянным радиусом по переходам. Последнее характерно для МИД. Еще одним фактором, влияющим на выбор ширины заготовки, являются условия формирования угловых зон.

При формовке угловых зон в открытых калибрах схема внешних воздействий на первых переходах близка к схеме гибки с растяжением (рис. 2.1,а), а на последних переходах, где осуществляется обжим заготовки по наружному контуру, схема внешних воздействий близка к схеме гибки с торцевым сжатием (рис. 2.1,б). В первом случае заготовка, как правило, получает утонение, а во втором – утолщение. При интенсивном деформировании формовку заготовки (даже на первых переходах)

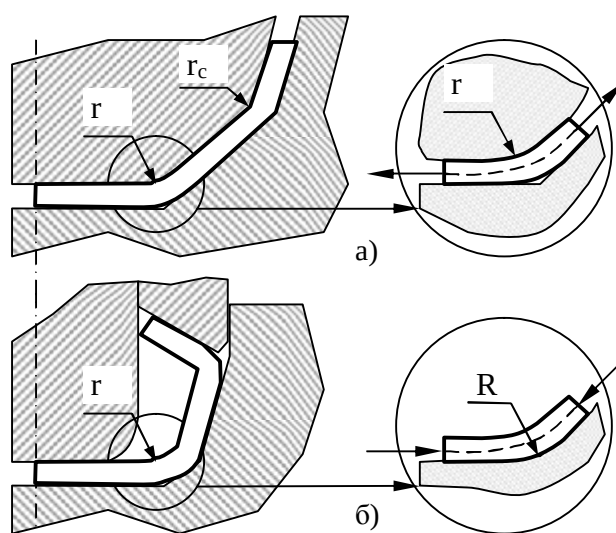


Рис.2.3. Формовка угловых зон: а – на первых переходах; б – на последних переходах

осуществляют в закрытых калибрах.

На *предварительных переходах*, где формовка осуществляется по открытой схеме с всесторонним доступом инструмента (см. рис. 2.3,а), схему приложения сил можно представить как показано на рис. 2.4. Данное рассмотрение относится к углам, примыкающим к стенке профиля, поскольку растягивающие силы возникают вследствие перетяжки элемента через участок инструмента, соответствующий зоне изгиба угла при будущей смыкающейся полке. Однако схема растяжения присуща и углам, примыкающим к смыкающимся полкам.

Допущения, используемые при разработке модели: 1) Материал заготовки – неупрочняемый; 2) Нейтральный слой напряжений совпадает с нейтральным слоем деформаций; 3) Нагрузка при посадке наружного или внутреннего контура криволинейного участка заготовки на инструмент распределяется равномерно; 4) Сила подгибки смыкающейся полки имеет точку приложения на границе прямолинейного и криволинейного участков заготовки; 5) Имеют место изменения внутреннего и наружного радиусов зоны изгиба даже в условиях посадки контуров зоны сгиба на инструмент; 6) В пределах криволинейного участка заготовки утонение или утолщение распределяется равномерно.

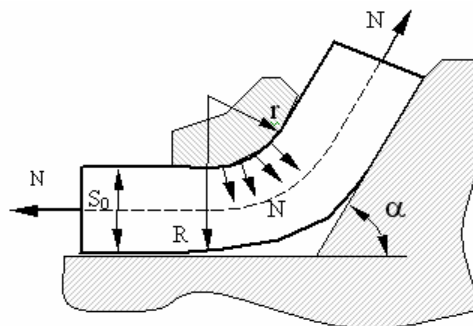


Рис. 2.4. Схема приложения сил на предварительных переходах

Пусть на скругленном участке верхнего ролика нагрузка от действия растягивающих сил распределена равномерно с интенсивностью p . Величину интенсивности нагрузки (давление на инструмент) можно связать с действующей силой. Действительно, в проекции на биссектрису угла действие растягивающих сил составляет величину $2 \cdot N \cdot \cos[(\pi - \alpha)/2]$, а проекция распределенной нагрузки определяется интегралом:

$$\int_{-a/2}^{a/2} p r \cos q \cdot dq ,$$

где α – уголгиба; θ – угол между вектором распределенной погонной силы и биссектрисой угла; r – радиус кривизны внутреннего контура зоны сгиба.

Приравнивая эти силы, получим:

$$-2N \cos\left(\frac{p}{2} - \frac{a}{2}\right) = \int_{-a/2}^{a/2} p \cdot r \cdot \cos q \, dq. \quad (2.2)$$

Проводя преобразования обеих частей уравнения (2.1), получим:

$$N = -p \cdot r. \quad (2.3)$$

Для вычисления смещения нейтрального слоя и последующего определения изменения толщины заготовки в угловой зоне следует рассмотреть ее напряженно-деформированное состояние. Применим инженерный метод [38] для определения напряжений и положения нейтрального слоя по напряжениям. Уравнение равновесия угловой зоны имеет вид:

$$\frac{\partial s_r}{\partial r} + \frac{s_r - s_q}{r} = 0, \quad (2.4)$$

где s_r, s_q – радиальное и окружное напряжение соответственно; r – текущее значение радиуса.

Упрощенное условие пластичности можно записать в виде:

$$s_r - s_q = s_T^* \text{ (зона сжатия)}, \quad (2.5)$$

$$s_r - s_q = -s_T^* \text{ (зона растяжения)}, \quad (2.6)$$

где s_T^* – модифицированный предел текучести материала заготовки.

Граничные условия имеют вид:

$$s_r(r = r) = -p \text{ (зона сжатия)}, \quad (2.7)$$

$$s_r(r = R) = 0 \text{ (зона растяжения)}, \quad (2.8)$$

где R – радиус кривизны наружного контура зоны изгиба.

Используя соотношения (2.4), (2.5) и (2.7), получим распределение радиальных напряжений в сжатой зоне:

$$s_r^{pc} = s_T^* \cdot \ln \frac{r}{r} - p. \quad (2.9)$$

Интегрируя уравнение (2.4) с использованием условий (2.6) и (2.8), получим решение для зоны растяжения:

$$s_r^{pp} = s_T^* \cdot \ln \frac{r}{R}. \quad (2.10)$$

«Сшивая» решения (2.9) и (2.10), получим значение радиуса кривизны нейтрального слоя:

$$r_n = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(-\frac{p}{2s_t^*}\right). \quad (2.11)$$

Приближенное значение давления p можно получить из условий перетяжки материала через участок верхнего ролика, соответствующий положению зоны изгиба, примыкающей к смыкающейся полке. Погонная сила $|N|$, возникающая в зоне перетяжки, определяется соотношением:

$$|N| = \frac{s_t^* \cdot s_0^2}{2(r_c + s_0/2)}, \quad (2.12)$$

где r_c – радиус скругления ролика в зоне изгиба, примыкающей к смыкающейся полке.

Из соотношений (2.3) и (2.12) получим приближенно:

$$p = \frac{s_t^* \cdot s_0^2}{2r(r_c + s_0/2)}. \quad (2.13)$$

Из формулы (2.11) с учетом зависимости (2.13) получим значение радиуса кривизны нейтрального слоя:

$$r_n^p = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(-\frac{s_0^2}{4r(r_c + s_0/2)}\right). \quad (2.14)$$

Положение нейтрального слоя определяется исключительно геометрическими характеристиками заготовки и не зависит от ее механических свойств. Следует иметь в виду, что входящие в формулу (2.14) радиусы r и r_c определяются выбранной схемой формообразования.

Последние переходы характеризуются изгибом с обжимом заготовки по наружной поверхности и в некоторых переходах с приложением сил к торцам смыкающихся полок (рис. 2.3,б). Для выявления положения нейтрального слоя напряжений, используемого далее при вычислении изменения толщины зоны изгиба, решим уравнение равновесия (2.4) с условиями пластичности (2.5) и (2.6). Граничные условия при посадке наружного контура зоны изгиба на инструмент имеют вид:

$$s_r(r = r) = 0 \text{ (зона сжатия)}, \quad (2.15)$$

$$s_r(r = R) = -q \text{ (зона растяжения)}, \quad (2.16)$$

где q – давление инструмента на заготовку по наружному контуру зоны изгиба.

Из соотношений (2.14) и (2.15) получаем радиальное напряжение для сжатой зоны:

$$s_r^{cc} = -s_T^* \cdot \ln \frac{r}{R}. \quad (2.17)$$

Используя формулы (2.4), (2.6) и (2.16), получим также радиальное напряжение для зоны растяжения:

$$s_r^{cp} = -s_T^* \cdot \ln \frac{R}{r} - q. \quad (2.18)$$

«Сшивание» решений (2.17) и (2.18) дает формулу для определения радиуса кривизны нейтрального слоя напряжений:

$$r_n = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(\frac{q}{2s_T^*}\right). \quad (2.19)$$

Как и при растяжении, погонная сила торцового сжатия T и давление инструмента на заготовку по наружному контуру зоны изгиба связаны формулой:

$$|T| = qR. \quad (2.20)$$

Для приближенного подсчета величины давления q рассмотрим схему подгибки и обжима заготовки (рис. 2.5). Погонная сила N создает изгибающий момент, необходимый для приведения примыкающей к смыкающейся полке угловой зоны в пластическое состояние, и выражается следующим уравнением:

$$\frac{s_T^* \cdot s_0^2}{4} = rT', \quad (2.21)$$

где T' – сила подгибки смыкающейся полки.

Сила в формуле (2.21) дает минимальное значение реальной силы торцового поджатия T . На рис. 2.5 видно, что при контакте торца заготовки с верхним роликом часть эффективной силы, осуществляющей подгибку полок, будет компенсирована составляющей силы трения между верхним роликом и торцом заготовки. Кроме того, в общем случае вектор силы T' может располагаться под некоторым углом к боковой подгибае-

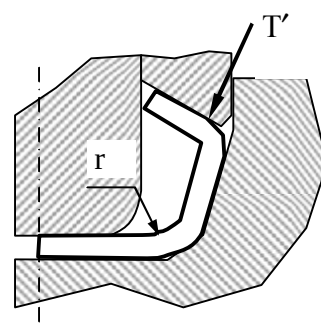


Рис.2.5. Схема обжима заготовки

мой полке. Так что действующая сила торцового поджатия будет представлена только некоторой составляющей силы T . Из соотношений (2.20) и (2.21) давление по наружной поверхности зоны сгиба определяется формулой:

$$q = \frac{s_t^* \cdot s_0^2}{4rR}. \quad (2.22)$$

Подставляя значение q из формулы (2.22) в соотношение (2.19), получим зависимость для расчета положения нейтрального слоя напряжений при обжиме заготовки в последних переходах:

$$r_n^c = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(\frac{s_0^2}{4rR}\right). \quad (2.23)$$

Для определения изменения толщины зоны изгиба обратимся к скоростям и деформациям, сопровождающим процесс формообразования заготовки. Согласно работе [121], скорости перемещения материала в радиальном и окружном направлениях соответственно могут быть представлены зависимостями:

$$u = -\frac{1}{2a} \left(r + \frac{r_n^2}{r} \right), \quad v = r \frac{q}{a}, \quad (2.24), (2.25)$$

где a – суммарный угол подгибки; r, q – текущие координаты, определяющие положение рассматриваемой точки.

Эти скорости совместимы с девиатором напряжений и отвечают условиям плоской деформации. В последнем легко убедиться, используя определение скоростей деформации в полярной системе координат:

$$\mathfrak{d}_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \mathfrak{d}_q = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial q} + u \right), \quad \mathfrak{d}_{rq} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial q} \right). \quad (2.26)$$

Подстановка скоростей из формул (2.24) и (2.25) в определения (2.26) приводит к следующему результату:

$$\mathfrak{d}_r = -\frac{1}{2a} \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2} \right), \quad \mathfrak{d}_q = \frac{1}{2a} \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2} \right), \quad \mathfrak{d}_{rq} = 0. \quad (2.27)$$

Из формул (2.27) видно, что $\mathfrak{d}_r, \mathfrak{d}_q$ являются главными скоростями деформации и, кроме того, выполняется условие несжимаемости материала заготовки. Следовательно, значения скоростей (2.24), (2.25) являются допустимыми для описания процесса деформирования. Радиальные скорости представляют собой приращения радиуса ρ за единицу времени, однако в случае

деформирования заготовки в роликах целесообразнее взять в качестве параметра нагружения приращение угла подгибки $\Delta\alpha$. Поэтому приращение произвольного радиуса на основании (2.24) можно представить в виде:

$$\Delta r = -\frac{1}{2a} \left(r + \frac{r_H^2}{r} \right) \cdot \Delta a. \quad (2.28)$$

Взяв разность приращений наружного и внутреннего радиусов на основании второй формулы из (2.27) и отнеся ее к толщине заготовки, получим:

$$\frac{\Delta s}{s_0} = -\frac{\Delta a}{2a} \left(1 - \exp \left(\frac{h}{s_T^*} \right) \right), \quad (2.29)$$

где h имеет значение p в случае растяжения и значение q – в случае сжатия.

Формулу (2.29) можно переписать для указанных двух случаев с учетом зависимостей (2.14) и (2.23) в следующей форме:

$$\frac{\Delta s}{s_0} = -\frac{\Delta a}{2a} \left(1 - \exp \left(-\frac{s_0^2}{4r(r_c + s_0/2)} \right) \right), \quad (2.30)$$

$$\frac{\Delta s}{s_0} = -\frac{\Delta a}{2a} \left(1 - \exp \left(\frac{s_0^2}{4rR} \right) \right). \quad (2.31)$$

На рис. 2.6 приведен график, выполненный на основе зависимости (2.30), а на рис. 2.7 – график, выполненный на основе зависимости (2.31).

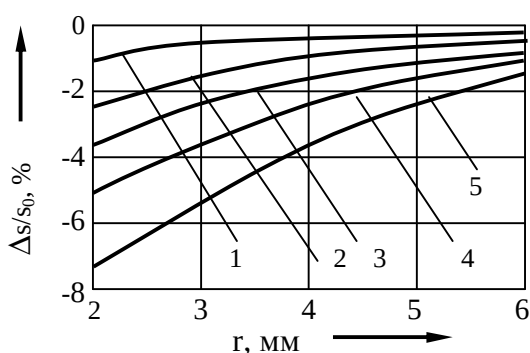


Рис. 2.6. Зависимость утонения от внутреннего радиуса и угла подгибки: 1, 2, 3, 4, 5 – $\Delta\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$

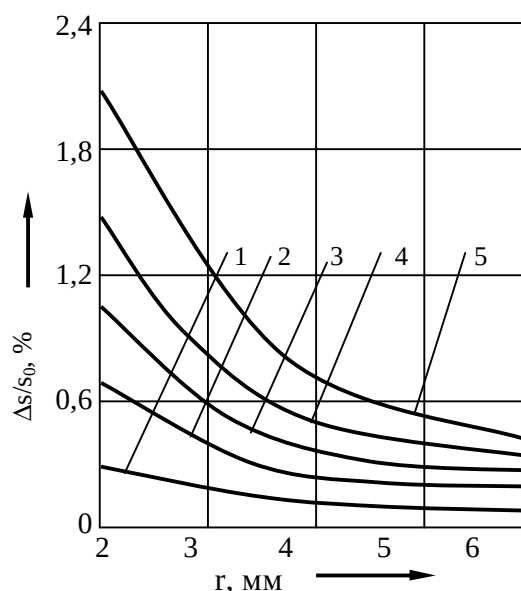


Рис. 2.7. Зависимость утолщения от внутреннего радиуса и угла подгибки: 1, 2, 3, 4, 5 – $\Delta\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$

Для расчета утонения или утолщения, например, для k -го перехода согласно формулам (2.30) и (2.31) надлежит вводить обозначения:

$$a = a_k, \quad \Delta a = a_k - a_{k-1},$$

где a_{k-1} , a_k – углы подгибки на предшествующем и текущем переходах.

После предварительного определения схемы формообразования, на основе рис. 2.6 и 2.7 можно подсчитать приращение ширины заготовки по формуле:

$$\Delta B = - \left[\sum_{k=1}^m \Delta s_k^p + \sum_{k=m+1}^n \Delta s_k^c \right] \frac{N(r + s_0 / 2)}{s_0}, \quad (2.32)$$

где m – число переходов, в которых происходит растяжение угловых зон; N – общее число переходов.

В формуле (2.32) приращение ширины заготовки определяется алгебраически, то есть ширину заготовки следует увеличивать или уменьшать в зависимости от знака величины ΔB . На практике ширина заготовки несколько превосходит ширину развертки готового профиля.

Разработанная модель дает весьма близкие результаты к экспериментальным данным по утонению угловых зон на первых переходах при традиционном профилировании [42], где среднее утонение составляет порядка 2%, хотя схемы формообразования МИД и ТП существенно различаются.

Особенность деформирования заготовки в первом переходе состоит в том, что происходит монотонное изменение радиуса ее кривизны от бесконечности до конечного значения на готовом профиле. При МИД изменение радиусов на последующих переходах незначительно в отличие от большинства схем ТП. Значение величины приращения заготовки ΔB , определяемой по формуле (2.32), входит в расчетную формулу ширины заготовки (2.1), что позволяет производить уточненный расчет заготовки и избежать ошибок при проектировании технологического оснащения для изготовления гнутых профилей полузакрытого типа. Полученные расчетные формулы не учитывают упрочнение, которое незначительно влияет на изменение толщины, однако упрочнение следует учитывать при определении минимально допустимого радиуса изгиба.

Таким образом, разработанная модель изменения толщины криволинейных участков заготовки в зависимости от расклада силовых факторов устанавливает тенденцию к увеличению утонения или утолщения с уменьше-

нием радиуса изгиба и с увеличением угла подгибки. Уточненный расчет ширины заготовки по разработанной модели [133] позволяет избежать ошибок при разработке технологического оснащения, сократить сроки и затраты на освоение технологии, повысить качество профилей за счет предотвращения потери устойчивости подгибаемых элементов.

Влияние упрочнения при высвобождении в угловой зоне [134].

Высвобождение угловых зон позволяет избежать неблагоприятного сочетания действия внешних сил по внутреннему контуру зоны изгиба и характерного для закрытого калибра «в размер» напряженного состояния поверхностных слоев заготовки (рис. 2.8,а). При этом поверхностные слои покрытия могут иметь повреждения, недопустимые с точки зрения обеспечения качества профиля [4].

При использовании МИД производят высвобождение угловых зон и предусматривают нормированный избыток заготовки для подсадки заготовки во избежание контакта заготовки по внутреннему контуру с роликом. Завышение избытка ширины заготовки приводит к «посадке» заготовки по наружному контуру на нижний ролик, приближая схему деформирования к схеме стесненного изгиба.

Часто конструкция профиля предусматривает гибку на малые радиусы заготовки из упрочняющихся материалов без существенного набора утолщения в угловой зоне. При этом важным становится вопрос о влиянии упрочнения на параметры НДС для решения практических вопросов определения минимального радиуса изгиба и пружинения, а также оценки жесткости угловых зон при расчетах на устойчивость

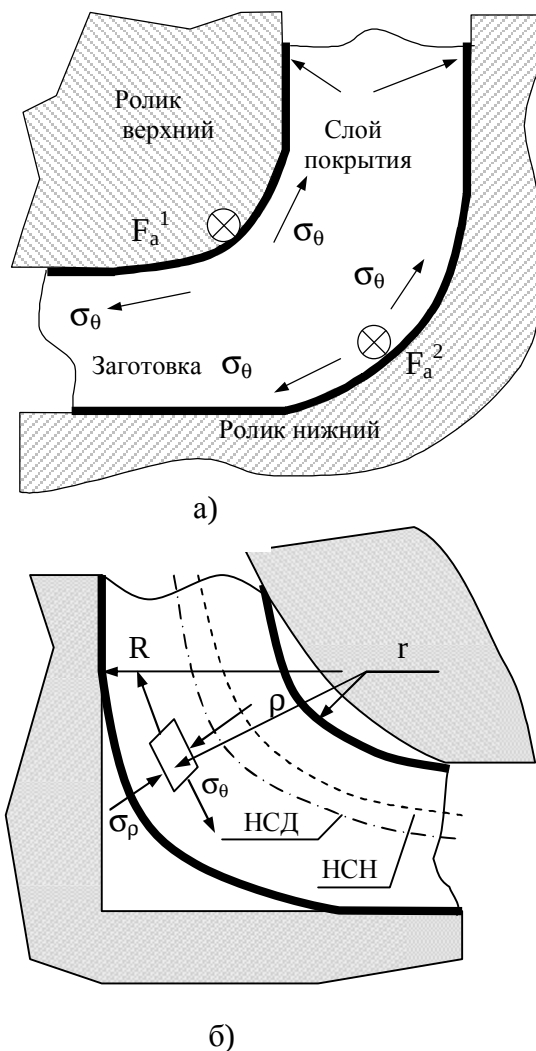


Рис. 2.8. Характеристики угловой зоны: а – силовые факторы и тангенциальные напряжения; б – геометрические параметры и вид напряженного состояния

заготовки в межклетьевом пространстве профилировочного станка.

Для угловой зоны профиля (рис. 2.8,б) с внутренним радиусом r , и наружным радиусом R примем исходные допущения: 1) материал считаем несжимаемым и упрочняющимся по линейному закону; 2) принимается схема плоской деформации; 3) компоненты тензора напряжений в угловой зоне зависят только от одной из координат; 4) принимается упрощенное условие пластичности; 5) справедлива гипотеза «единой кривой» [38]; 6) зона сжатия и зона растяжения равны по площади и разделяются НСД.

Общие дифференциальные уравнения равновесия $\sigma_{ij,j} = 0$ (σ_{ij} – компоненты напряжений; “, j” означает дифференцирование по j-ой координате) [113] для угловой зоны в силу допущений «2» и «3» вырождаются в одно уравнение:

$$\rho \cdot \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0, \quad (2.33)$$

где σ_ρ , σ_θ – радиальное и окружное напряжение соответственно; ρ – переменная интегрирования.

Условие пластичности в соответствии с допущениями «1», «4» и «5» принимается в виде:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \pm(\sigma_T + \lambda \cdot \varepsilon_i), \quad (2.34)$$

где σ_T – предел текучести материала заготовки; λ – показатель упрочнения; ε_i – интенсивность деформаций сдвига.

Знаки «+» и «–» в уравнении (2.34) относятся к зонам сжатия и растяжения соответственно. Условие несжимаемости в соответствии с допущением «1» имеет следующий вид:

$$\varepsilon_\rho + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0, \quad (2.35)$$

где ε_ρ , ε_θ , ε_z – радиальная, окружная и аксиальная компонента тензора деформаций соответственно.

В силу допущения «2» аксиальная деформация $\varepsilon_z = 0$, тогда из уравнения (2.35) следует, что

$$\varepsilon_\rho = -\varepsilon_\theta. \quad (2.36)$$

С учетом условия (2.36), интенсивность деформации сдвига имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varepsilon_\rho \quad . \quad (2.37)$$

Учитывая определение окружной деформации и зависимость (2.36), интенсивность деформации сдвига представляется соотношением:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[1 - \frac{\rho}{\rho_\varepsilon} \right] , \quad (2.38)$$

где ρ_ε – радиус кривизны нейтрального слоя деформаций (НСД).

Значение ρ_ε определяется на основе допущения «б» из геометрических соотношений угловой зоны:

$$\rho_\varepsilon = \sqrt{\frac{r^2 + R^2}{2}} , \quad (2.39)$$

где r, R – радиусы кривизны внутреннего и наружного контура зоны сгиба соответственно.

Определим напряжения в зоне растяжения, решая уравнение равновесия (2.33) совместно с условием пластичности (2.34) с учетом определения интенсивности деформаций сдвига (2.38).

$$\rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} = \left[\sigma_\tau + \frac{2\lambda}{\sqrt{3}} \right] - \frac{2\lambda}{\rho_\varepsilon \cdot \sqrt{3}} \cdot \rho \quad . \quad (2.40)$$

Введем обозначения:

$$A = \sigma_\tau + \frac{2 \cdot \lambda}{\sqrt{3}} , \quad B = \frac{2 \cdot \lambda}{\rho_\varepsilon \cdot \sqrt{3}} . \quad (2.41)$$

Интегрируя дифференциальное уравнение (2.40), с учетом обозначений (2.41), получим:

$$\sigma_\rho = A \cdot \ln \rho - B \cdot \rho + C , \quad (2.42)$$

где C – постоянная интегрирования.

Учитывая отсутствие контакта инструмента с наружным контуром зоны изгиба, постоянная интегрирования приобретает следующее значение:

$$C = B \cdot R - A \cdot \ln R . \quad (2.43)$$

Подстановка величины C из формулы (2.43) в зависимость (2.42) дает распределение радиальных напряжений в зоне растяжения:

$$\sigma_{\rho}^p = A \cdot \ln \left(\frac{\rho}{R} \right) + B(R - \rho) . \quad (2.44)$$

Проводя аналогичные вычисления для зоны сжатия, получим значения радиальных напряжений для сжатой зоны:

$$s_r^c = A \cdot \ln \left(\frac{r}{r} \right) + B(r - r) , \quad (2.45)$$

Окружные напряжения для обеих зон определяются из условия (2.34).

Легко видеть, что в случае отсутствия упрочнения, уравнения (2.44) и (2.45) сводятся к известным решениям аналогичной задачи для случая идеальной пластичности [113], поскольку из формул (2.41) следует: $A = \sigma_{\tau}$, $B = 0$. При этом нейтральный слой деформаций смещается при деформировании по отношению к срединной поверхности и, хотя нами он был принят за границу между зонами сжатия и растяжения, его значение вовсе не гарантирует равенства радиальных напряжений (2.44) и (2.45) на этой границе. Границу «сшивания» радиальных напряжений можно найти, приравнявая напряжения (2.44) и (2.45):

$$A \cdot \ln \left(\frac{\rho_{\sigma}^2}{r \cdot R} \right) = B(2\rho_{\sigma} - r - R) , \quad (2.46)$$

где ρ_{σ} – радиус кривизны нейтрального слоя напряжений (НСН).

Уравнение (2.46) – трансцендентное и может быть решено только численными методами. В предельном случае идеальной пластичности оно приводит к хорошо известному результату: $\rho_{\sigma} = \sqrt{r \cdot R}$.

Определение значений радиусов кривизны НСН для частных случаев материалов и конфигураций зон сгиба может быть произведено с помощью компьютера на основе формулы (2.46), однако важнее определить величину дрейфа НСН и изменение значений напряжений в зависимости от радиусагиба и свойств материала, в первую очередь, от его способности к упрочнению.

На рис. 2.9 представлена зависимость смещения НСН от срединной поверхности в процентах Δ от относительного радиусагиба, построенная с помощью прикладной компьютерной программы на основе формулы (16). Алгоритм вычислений предусматривает задание начальных условий, образование функции невязки на базе соотношения (16), вычисление корней функции

невязки, вычисление относительной величины смещения НСН, построение графической зависимости.

Из рис. 2.9, покрывающего диапазон значений относительного радиусагиба от 1 до 9, видно, что для неупрочняющегося материала (кривая 1) смещение НСН не превышает 6%, а при относительном радиусе более 3 смещение не превышает 1%. При наличии упрочнения ($\lambda = 400$ МПа) смещение в среднем в два раза больше.

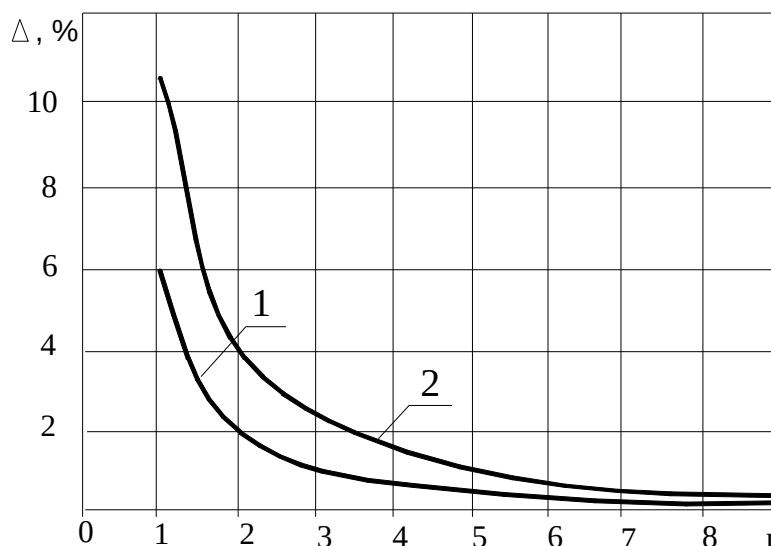


Рис. 2.9. Зависимость смещения НСН от радиусагиба: 1, 2 – $\lambda = 0$; 400 МПа соответственно

Расчеты для малых относительных радиусов изгиба показывают, что смещение нейтрального слоя напряжений существенно больше: для неупрочняющегося материала величина смещения имеет тенденцию к увеличению от 5 до 45% при изменении относительного радиуса изгиба от 1,0 до 0,1, а для упрочняющегося материала – от 10 до 55% при том же изменении относительного радиуса изгиба (рис. 2.10).

Обобщенную характеристику напряженного состояния в угловой зоне определяли по формуле [38]:

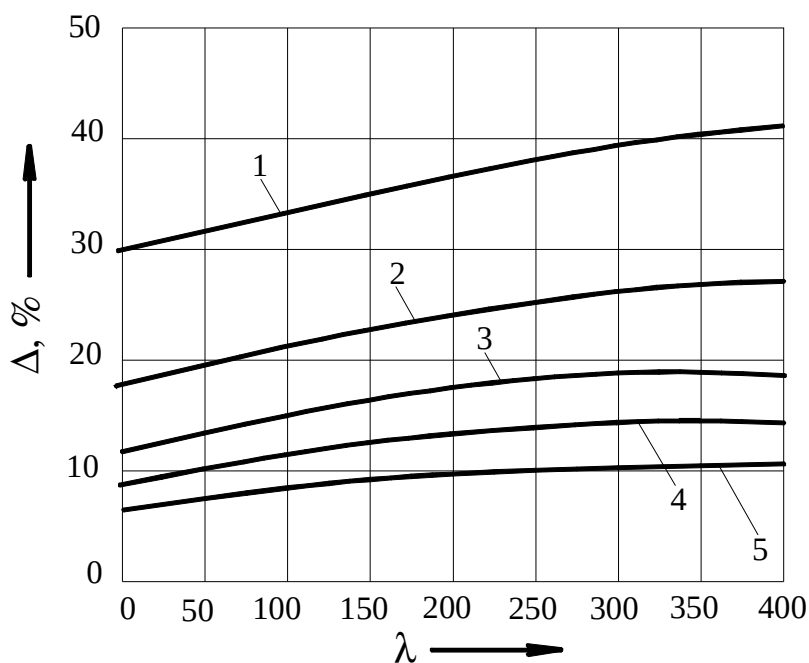


Рис. 2.10. Зависимость смещения нейтрального слоя от степени упрочнения материала: 1, 2, 3, 4, 5 – $r = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2} . \quad (2.47)$$

Для наглядного представления распределения напряжений σ_i , σ_ρ , σ_θ проведен численный расчет и построение соответствующих зависимостей. Алгоритм вычислений распределения напряжений в зоне изгиба предусматривает задание начальных условий, образование функции невязки на базе соотношения (2.46), вычисление корней функции невязки, задание диапазона изменения переменной ρ с верхним значением для зоны сжатия (нижним значением для зоны растяжения), равным корню функции невязки, вычисление радиальных и окружных напряжений, построение графических зависимостей.

Результаты расчета, приведенные на рис. 2.11 для случая гибки на единственный относительный радиус, показывают, что в зоне сжатия радиальные напряжения на внутреннем контуре равны нулю, что отвечает условию высвобождения калибра по внутреннему контуру заготовки. При движении к нейтральному слою напряжений радиальные напряжения возрастают по абсолютной величине, причем, для упрочняющегося материала их значение примерно на 20% выше, чем для неупрочняющегося (см. кривые 2 и 2у на рис. 2.11). При этом рост окружных напряжений (по абсолютной величине) следует изменению радиальных напряжений для неупрочняющегося материала с небольшим замедлением для упрочняющегося материала (см. кривые 3 и 3у). Интенсивность напряжений для неупрочняющегося материала практически остается на уровне, близком к значению предела текучести, а для упрочняющегося материала – имеет тенденцию к снижению. Поведение функции интенсивности напряжений для стесненного изгиба изучено в работах [135, 136] методом конечных элементов, которые представляют сходные результаты.

В зоне растяжения радиальные напряжения принимают нулевые значения (см. тенденцию кривых 2 и 2у на рис. 2.11), а окружные напряжения для неупрочняющегося материала растут, в то время как для упрочняющегося материала наблюдается спад окружных напряжений (см. кривые 3 и 3у). Вблизи нейтрального слоя окружные напряжения испытывают скачок, как это предсказывает теория пластического изгиба [113]. При этом интенсив-

ность напряжений для упрочняющегося материала имеет тенденцию к спаду до 230 МПа на наружном контуре зоны сгиба (см. кривую 1у).

Данное рассмотрение относилось к случаю пластического изгиба на относительный радиус, равный единице. При больших значениях относительного радиуса изгиба закономерности изменения напряжений сохраняются с тем отличием, что влияние упрочнения уменьшается.

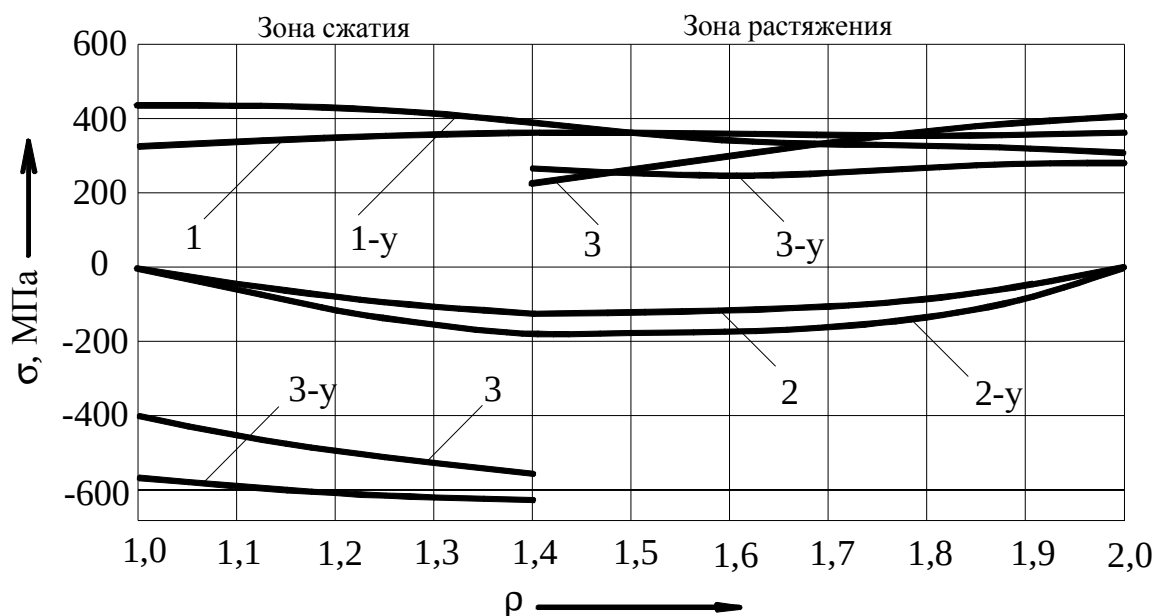


Рис. 2.11. Распределение напряжений в зависимости от степени упрочнения материала заготовки единичной относительной толщины: а – зона сжатия; б – зона растяжения: 1, 2, 3 – σ_i , σ_p , σ_θ соответственно; у – упрочняющийся материал

Полученные результаты показывают, что при упрочнении происходит разгрузка материала вблизи наружного контура зоны изгиба и значительное нагружение вблизи внутреннего контура. Это означает, что при использовании упрочняющегося материала с покрытием следует по возможности ослаблять контакт внутреннего контура зоны сгиба с роликом за счет подсадки подгибаемой полки. С другой стороны, если считать справедливой гипотезу «единой кривой», то можно прогнозировать уровень деформаций на наружном контуре и на этой основе формулировать ограничительные условия для предельного радиуса изгиба заготовки. Полученные зависимости можно использовать в аналитической форме для установления предельных параметров, пружинения и жесткости угловых зон при формообразовании МИД профилей из упрочняющихся материалов по аналогии с методикой работы [19], где рассмотрен неупрочняющийся материал.

Ограничения на внутреннем контуре при подсадке полки [137]. При подсадке (торцевом поджатии) полки возникает задача установления допустимого диапазона геометрических параметров угловой зоны профиля в связи с существенным уменьшением радиуса изгиба и появлением при значительной подсадке дефектов типа зажимов и отслоения покрытия на внутреннем контуре. Замкнутое решение этой задачи может быть получено методом прямого интегрирования в цилиндрической системе координат при следующих допущениях: 1. Деформация считается плоской. 2. Материал считается изотропным, жестко-пластичным, неупрочняемым. 3. Касательные напряжения представляются мультипликативной функцией по двум координатам.

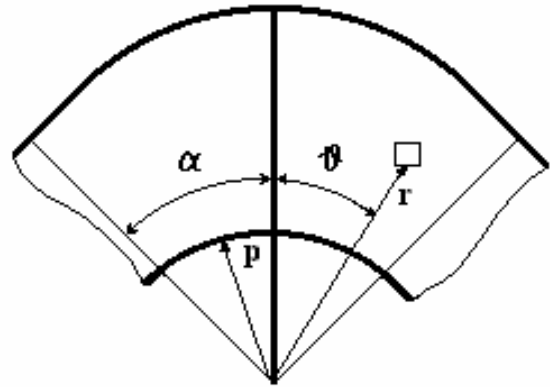


Рис. 2.12. Зона изгиба профиля (с безразмерными параметрами)

Пусть напряжения зависят от отнositельного радиуса r , исходящего из центра кривизны контура внутренней поверхности зоны сгиба при трансверсальном сечении профиля, и угла поворота q радиуса вектора относительно биссектрисы угла (рис. 2.12). Третья ось, обозначаемая буквой Z , совпадает с линиейгиба и расположена перпендикулярно плоскости сечения. С учетом первого допущения можно ввести обозначения напряжений [137]:

$$\begin{aligned} s_{rr} &= s_{rr}(r, q); & s_{qq} &= s_{qq}(r, q); & s_{rq} &= s_{rq}(r, q); \\ s_{zr} &= s_{zq} = 0; & s_{zz} &= s_{zz}(r, q). \end{aligned} \quad (2.48)$$

Здесь обозначение напряжений традиционно: первый индекс обозначает положение элементарной площадки в пространстве (перпендикулярно соответствующей оси), а второй совпадает с направлением действующей силы.

Условие плоской деформации (деформация $\epsilon_{zz} = 0$) дает:

$$s_{zz} = (s_{rr} + s_{qq})/2. \quad (2.49)$$

Уравнения равновесия в цилиндрической системе координат с учетом формул (2.48) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial s_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial s_{rq}}{\partial q} + \frac{s_{rr} - s_{qq}}{r} = 0; \\ \frac{\partial s_{rq}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial s_{zz}}{\partial q} + \frac{s_{rq}}{r} = 0. \end{cases} \quad (2.50)$$

Условие пластичности при плоской деформации имеет вид:

$$(s_{rr} - s_{qq})^2 + 4s_{rq}^2 = \frac{4q_s^2}{3} = 4k^2, \quad (2.51)$$

где q_s – предел текучести материала; k – максимальное касательное напряжение.

Совместное решение системы (2.50) и уравнения (2.51) с учетом соотношения (2.49) приводит к следующему дифференциальному уравнению в частных производных второго порядка относительно касательных напряжений σ_{rq} , которое может быть решено лишь при некоторых дополнительных условиях:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial^2 s_{rq}}{\partial q^2} + \left[\pm \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial q} \sqrt{k^2 - s_{rq}^2} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s_{rq}}{\partial r} \right) + \\ & + \left[\pm \frac{\partial^2}{\partial r \partial q} \sqrt{k^2 - s_{rq}^2} \right] - \frac{\partial s_{rq}}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Решение уравнения (2.52), в соответствии с третьим допущением, дает:

$$\boxed{} \quad (2.53)$$

где $y(r)$ и $j(q)$ – пока не определенные функции.

Переходя к безразмерным напряжениям путем деления σ_{rq} на k , после подстановки решения (2.53) в уравнение (2.52), при условии $\frac{\partial^2 j(q)}{\partial q^2} = \frac{p^2}{a^2}$ (условие разрешимости уравнения (2.52)) и осреднении члена, содержащего функции от q , с учетом начальных условий для $j(q)$ получим:

$$j(q) = \sin(\pi\theta/\alpha), \quad r^2 \frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + 2r \frac{\partial y}{\partial r} - \gamma y = 0. \quad (2.54)$$

Здесь $\gamma = (\pi/\alpha)^2$.

Второе дифференциальное уравнение в зависимостях (2.54) имеет следующее общее решение [138]:

$$y(r) = C_1 r^a + C_2 r^b, \quad (2.55)$$

где $\alpha = (\mu-1)/2$; $\beta = -(\mu+1)/2$; $\mu = (1 + 4\gamma)^{1/2}$.

Удовлетворяя граничным условиям на наружном контуре, из решения (2.55) получим функцию $\psi(r)$:

$$y(r) = \left(\frac{p}{r}\right)^{(m+1)/2} \cdot \left[\frac{R^m - r^m}{R^m - p^m}\right] \cdot (n/p)^{1/2}, \quad (2.56)$$

где n – величина относительного утолщения зоны сгиба по биссектрисе угла;
 p – относительный внутренний радиус зоны сгиба.

Граничные условия определяются исходя из физических соображений – касательные напряжения на наружном контуре должны отсутствовать, ибо вблизи наружного контура выполняются условия, приближенные к условиям обычной гибки. Радиус кривизны наружного контура зоны сгиба R можно задать приближенно:

$$R = p + 1 + n. \quad (2.57)$$

В конечном виде зависимость для определения касательных напряжений на основании выражений (2.53), (2.54) и (2.56) может быть представлена так:

$$s_{rq}(r, q) = k \sin(\pi\theta/\alpha) \cdot \left(\frac{p}{r}\right)^{(m+1)/2} \cdot \left[\frac{R^m - r^m}{R^m - p^m}\right] \cdot (n/p)^{1/2}. \quad (2.58)$$

Анализ зависимости (2.58) показывает, что на биссектрисе угла и на линии сопряжения упругой и пластической зон касательные напряжения равны нулю (угол θ равен нулю и α соответственно). На наружном контуре ($R = r$) касательные напряжения также обращаются в нуль, что соответствует реальному напряженному состоянию в угловой области. Вблизи внутреннего контура касательные напряжения принимают максимальные значения. Для наглядности приведем диаграмму распределения касательных напряжений в угловой зоне с учетом относительного торцевого сжатия, выполненную в среде MathCAD-2000 (рис. 2.13), где значение относительного торцевого сжатия $m = \sigma_a/\sigma_s$ принято равным 0,3. Здесь σ_a и σ_s – напряжение торцевого поджатия и предел текучести материала соответственно. Вместо $\sigma_{r\theta}$ введена безразмерная функция $t(u, r) = \sigma_{r\theta} / k$, где $u = \theta$.

При больших значениях подсадки (напряжение поджатия приближается к пределу текучести материала), согласно предлагаемой модели, относительные касательные напряжения приближаются к единице. Это означает, что гипотеза плоских сечений перестает быть справедливой и распределение касательных напряжений по углу представляется двугорбой кривой. В местах максимума касательных напряжений следует ожидать

исчерпания ресурса пластичности, что в реальности наблюдается при значительных напряжениях торцевого поджатия. Так, при $m = 0,7$ уже имеют место дефекты внутреннего контура при утолщении зоны сгиба до 18 % [24].

В области, близкой к биссектрисе угла и внутреннему контуру, зависимость (2.58) хорошо согласуется с моделью работы [107], где касательные напряжения даны формулой $t = (n \cdot r \cdot \sin \theta) / (1 - \cos \alpha)$, полученной с использованием метода возмущений в растянутых координатах Лайтхилла [107].

Математическая модель позволяет установить диапазон допустимых значений геометрических параметров угловой зоны и допустимых значений подсадки с целью назначения геометрических параметров калибров формирующих роликов и уточнения ширины заготовки. Кроме того, изучение зон изгиба является весьма важным при необходимости формовки рифтов, в большинстве случаев в донной части профиля, что позволяет оптимизировать число технологических переходов.

2.3. Формовка рифтов и число переходов при формообразовании полузакрытого профиля

Одним из путей уменьшения числа переходов является одновременная формовка рифтов или гофр и подгибка периферийных элементов [139]. Этот процесс сопровождается перетяжкой заготовки через ролики и ее утонением, а также боковой утяжкой материала, влияющей на устойчивость процесса деформирования. Жесткие требования к утонению заготовки и требование устойчивости деформирования являются важными факторами, оп-

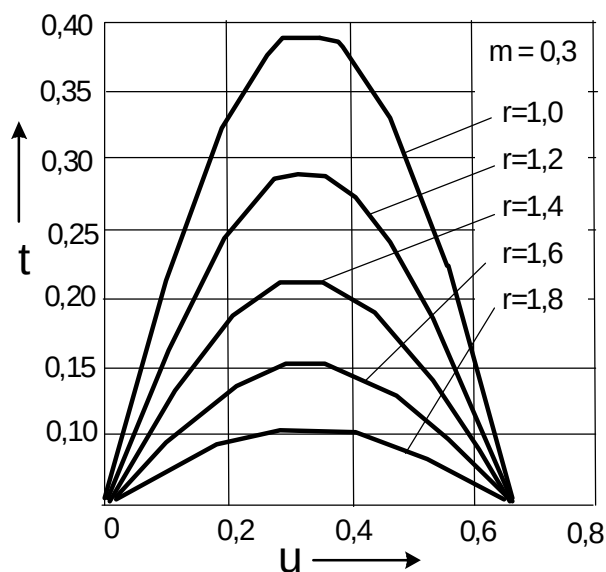


Рис. 2.13. Распределение напряжений в угловой зоне

ределяющими количество переходов и число одновременно формуемых рифтов.

Пусть конфигурация рифтов будет представлена сечением, изображенным на рис. 2.14. Исходя из условия плоского деформированного состояния и несжимаемости, можно найти ширину заготовки B_3 на один рифт:

$$B_3 = l_1 + l_2 + 2 \cdot (H + s_0) / \cos \alpha + \\ + (r_1 + r_2 + s_0) \cdot [p / 2 - a - 4 \cdot \operatorname{tg}(p / 4 - a / 2)] - \\ - 2 \cdot s_0 \cdot \operatorname{tg}(p / 4 - a / 2) + \Delta_D, \quad (2.59)$$

где l_1, l_2 – ширина верхней и нижней стенок; H – высота рифта; s_0 – толщина стенок; α – угол между боковой стенкой и вертикалью; r_1, r_2 – внутренние радиусы сопряжения верхней и боковой стенки, нижней и боковой стенки соответственно; Δ_D – дополнительный избыток заготовки на случай осадки рифтов в последних переходах.

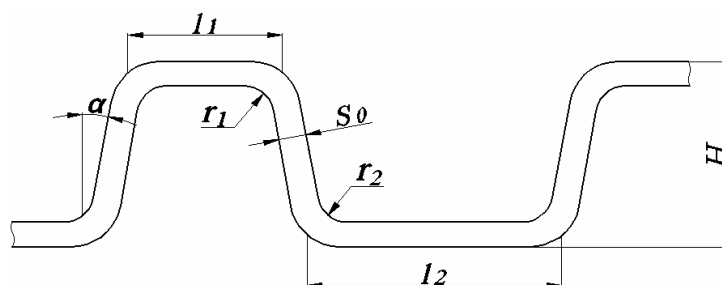


Рис. 2.14. Конфигурация формуемых рифтов

Величину Δ_D можно определить аналитически или экспериментально, однако величина Δ_D не оказывает влияния на процесс формообразования на предварительных переходах, поэтому достаточно указать диапазона изменений ее значений: $\Delta_D = (0,1 \dots 0,8) \cdot s_0 \cdot n$, где n – число зон изгиба одного рифта. Задавая число рифтов M и принимая во внимание формулу (2.59) с выбранным значением Δ_D , получим требуемую величину ширины заготовки $M \cdot B_3$.

Рассмотрим упрощенную схему формообразования на предварительных переходах, при которой рельеф верхнего и нижнего формирующих валков представляется роликами диаметром $2R_j$ со скруглением r_j , которые вдавливаются в заготовку на глубину Δh_j на j -м переходе (рис. 2.15,а).

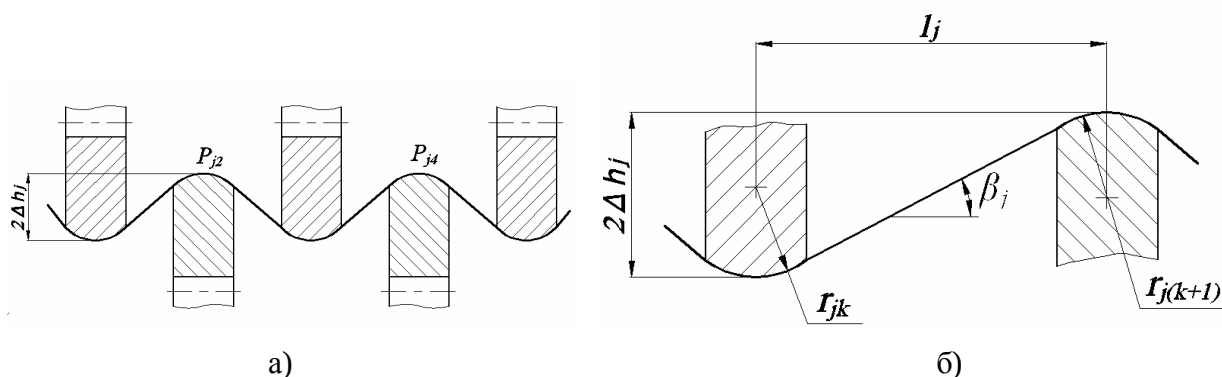


Рис. 2.15. Схемы предварительной формовки: а – схема вдавливания роликов в заготовку и ее перетяжка; б – геометрические параметры на предварительном переходе

Во-первых, определим углы наклона прямолинейных участков заготовки и площадь контакта ролика и заготовки на каждом из переходов. Во-вторых, установим систему уравнений для сил, действующих на элементы заготовки. В-третьих, решим задачу изгиба заготовки с радиальным нагружением одного из контуров зоны изгиба. Затем, определим компоненты скорости деформации и разность приращений внутреннего и наружного радиусов, а следовательно, утонение заготовки по сечению, после чего появится возможность определения числа переходов.

Обозначим силу, действующую на k -й ролик на j -м переходе через P_{jk} , а геометрические характеристики – согласно рис. 2.15,б. Из соображений простоты изготовления инструмента в качестве образующей рабочей части инструмента возьмем дугу окружности радиусом r_{jk} для k -го ролика j -го перехода. При этом имеют место соотношения:

$$r_{jk} = r_{j(k+2)}, \quad (2.60)$$

Формула (2.60) носит частный характер: радиусы скругления роликов, в принципе, могут быть различными в зависимости от конфигурации поперечного сечения рифта. Определим угол между прямолинейным участком заготовки и горизонталью на j -м переходе на основе геометрического рассмотрения из трансцендентного уравнения:

$$2(r_{j-1} \cdot b_{j-1} - r_j \cdot b_j) = \frac{l_{j-1}}{\cos b_{j-1}} - \frac{l_j}{\cos b_j} + 2\left(\frac{r_j \cdot \operatorname{tg} b_j}{\cos b_j} - \frac{r_{j-1} \cdot \operatorname{tg} b_{j-1}}{\cos b_{j-1}}\right).$$

Выражения для углов β_j можно использовать при составлении системы уравнений для действующих внешних сил.

Если ширина верхней и нижней стенок рифта одинаковы, то при эквидистантном расположении роликов на валу текущего перехода (формовка осуществляется преимущественно за счет вдавливания) получим следующее трансцендентное уравнение для определения β_j :

$$\operatorname{tg} b_j = \frac{h_j - 2r_j(1 - \cos b_j)}{l_j - 2r_j \sin b_j}. \quad (2.61)$$

Угол β_j между прямолинейным участком заготовки и горизонталью для данного перехода будет одинаковым между двумя соседними роликами, поэтому двойная индексация переменных условно опущена.

Изгиб заготовки в результате вдавливания в нее роликов происходит за счет действия вертикальной силы P_j , которая находится из равенства момента действия внешней силы и момента пластического деформирования участка заготовки в очаге пластической деформации:

$$P_j = \frac{\sigma_s \cdot s_0^2 \cdot x_j \cdot \operatorname{ctg} b_j}{2r_j}, \quad (2.62)$$

где σ_s – предел текучести материала заготовки; ξ_j – протяженность зоны контакта инструмента и заготовки, определяемая по формуле:

$$x_j = \sqrt{2 \cdot R_j \cdot \Delta h_j - \Delta h_j^2}, \quad (2.63)$$

где R_j – радиус формующего ролика.

В формуле (2.63) Δh_j представляет собой приращение глубины вдавливания роликов на текущем переходе, которое определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \Delta h_j = h_j - h_{j-1} = & 2 \cdot r_j \cdot (1 - \cos b_j) - 2 \cdot r_{j-1} \cdot (1 - \cos b_{j-1}) + \\ & + \operatorname{tg} b_j \cdot (l_j + 2 \cdot r_j \cdot \sin b_j) - \operatorname{tg} b_{j-1} \cdot (l_{j-1} + 2 \cdot r_{j-1} \cdot \sin b_{j-1}). \end{aligned} \quad (2.64)$$

Сила вдавливания распределена неравномерно по роликам текущего перехода в связи с перетяжкой заготовки. Учитывая трение при перетяжке по закону Эйлера, получим для k -го ролика (отсчет ведется от крайнего ролика) j -го перехода значение действующей силы:

$$P_{jk} = P_j \cdot (1 + \exp(2 f b_j))^k. \quad (2.65)$$

По формулам (2.61) – (2.65), представленным в виде системы рекуррентных соотношений, можно определить среднюю силу вдавливания при формообразовании заготовки.

Вычислим приближенно площадь зоны вдавливания путем факторизации протяженности зоны контакта k -го ролика и заготовки в продольном и поперечном направлениях на j -м переходе:

$$A_{jk} \approx 2 \cdot b_j \cdot r_{jk} \cdot R_j \cdot g_j, \quad (2.66)$$

где $g_j = \arccos(1 - h_j / R_j)$ – угол обхвата заготовкой k -го ролика на j -м переходе.

Среднее контактное давление по площади зоны вдавливания может быть определено с учетом формул (2.65) и (2.66) следующим образом:

$$q_{jk} \approx P_{jk} / A_{jk}. \quad (2.67)$$

Рассмотрим вдавливание как процесс гибки с растяжением, выделив узкую полосу заготовки с максимальной поперечной кривизной. Предположение об узости полосы позволяет рассматривать ее как плоскую в продольном направлении. Влиянием смежных участков можно пренебречь, поскольку заниженное значение контактного давления в определенной степени будет компенсировать ошибку, вызванную этим допущением. Уравнение равновесия для контактной зоны можно записать в виде:

$$\frac{d s_r^{jk}}{d r} + \frac{s_r^{jk} - s_q^{jk}}{r} = 0, \quad (2.68)$$

где s_r^{jk} , s_q^{jk} – радиальные и тангенциальные напряжения; r – текущий радиус кривизны.

Условие пластичности представим в упрощенном виде:

$$s_r^{jk} - s_q^{jk} = k \cdot s_s, \quad (2.69)$$

где $k = \text{sign}(r - r_0^{jk})$; r_0^{jk} – радиус нейтрального слоя.

Совместное решение уравнений (2.68) и (2.69) дает:

$$s_r^{jk} = k \cdot s_s \cdot \ln r + C, \quad (2.70)$$

где C – константа, подлежащая определению.

Граничные условия для решения уравнения (2.70) следующие:

$$s_r^{jk} = \begin{cases} -q_{jk}, & r = r_{jk}; \\ 0, & r = R_{jk}, \end{cases} \quad (2.71)$$

где $\overset{\#}{R}_{jk}$ – радиус кривизны наружного контура зоны сгиба.

Из уравнения (2.70) и граничных условий (2.71) с учетом значения функции k найдем величину напряжений в растянутой и сжатой зоне. Отметим, что окружная компонента на нейтральном слое испытывает скачок, в то время как радиальная компонента напряжений удовлетворяет условиям непрерывности. Следовательно, радиус нейтрального слоя легко определить из условия «сшивания» решения на границе зон растяжения и сжатия:

$$r_0^{jk} = \left[r_{jk} \cdot \overset{\#}{R}_{jk} \cdot \exp(-q_{jk} / s_s) \right]^{1/2}. \quad (2.72)$$

Компоненты скорости, совместимые со значениями девиатора, построенного на основе решения уравнения (2.70), определим по формулам [119]:

$$v_{jk}^r = -\frac{1}{2 \cdot j} \cdot \left[r + \frac{(r_0^{jk})^2}{r} \right], \quad v_{jk}^q = r \cdot q / j, \quad (2.73)$$

где v_{jk}^r, v_{jk}^q – скорость в радиальном и тангенциальном направлениях; φ – угол гиба; θ – текущий угол гиба.

С учетом соотношений (2.73) найдем приращения радиусов:

$$\begin{aligned} dr_{jk} / dj &= -\frac{1}{2 \cdot j} \cdot \left[r_{jk} + \overset{\#}{R}_{jk} \cdot \exp(-q_{jk} / s_s) \right], \\ d\overset{\#}{R}_{jk} / dj &= -\frac{1}{2 \cdot j} \cdot \left[\overset{\#}{R}_{jk} + r_{jk} \cdot \exp(-q_{jk} / s_s) \right]. \end{aligned}$$

Из этих выражений с учетом формулы (2.72) получим величину изменения толщины ds_{jk} заготовки в ее вершинной точке на k -ом ролике j -го перехода:

$$\frac{ds_{jk}}{dj} = \frac{s_{jk}}{2 \cdot j} \cdot \left[\exp(-q_{jk} / s_s) - 1 \right], \quad (2.74)$$

откуда следует, что утонение не происходит на периферийной части зоны сгиба ($d\varphi=0$) и при отсутствии контактных давлений ($q_{jk} = 0$). В формуле (2.74) приращение угла и сам угол можно рассматривать как текущее и конечное значение параметра соответственно.

Данная модель приложима к двум видам формовки: 1) при расположении формирующих роликов по сходящимся прямым во избежание пе-

реформовки угловых зон; 2) при расположении формующих роликов по параллельным прямым, что приводит к значительной боковой утяжке и переформовке зон изгиба.

Для первого вида формовки на основе данной модели можно определить требуемое число переходов на основе ограничения величины утонения заготовки. От перехода к переходу происходит накопление утонения на одних и тех же участках заготовки. Суммирование приращений толщины заготовки по индексу j дает полное утонение заготовки к переходу N , где конфигурация заготовки соответствует условиям ее осадки до конечной конфигурации профиля. Принятое изначально число переходов может привести к тому, что суммарное утонение окажется больше допустимого утонения δ , заданного техническими условиями. В этом случае число переходов следует увеличить и снова произвести расчет, повторяя процедуру до момента, когда суммарное утонение окажется меньше величины допустимого утонения. Последнее полученное в итерационной процедуре значение числа предварительных переходов объявляется искомым. Очевидно, в данном случае следует рассматривать лишь срединный или ближайший к нему рифт, поскольку на рифтах, расположенных ближе к периферии, утонение будет меньше. Описанный критерий назначения числа переходов представляется в следующем виде:

$$\frac{\Delta s_{\Sigma}}{s_0} = \left| \sum_{j=1}^N ds_{jk} / s_0 \right| \leq d, \quad (2.75)$$

Для второго вида формовки каждый из участков заготовки испытывает переформовку, так что в среднем утонение распределяется по ширине заготовки кусочно-равномерно и равно утонению, приобретаемому за один переход. В этом случае ограничение на утонение представляется следующим соотношением:

$$\left| \frac{ds_{jk}}{s_0} \right| \leq d, \quad (2.76)$$

Неравенство (2.76) может использоваться при оценке технологичности изготовления профилей на оборудовании с заранее заданным числом клеток. Здесь задача состоит в определении максимального числа рифтов заданного размера, которое может быть сформовано на предва-

рительных переходах без превышения допустимой величины утонения. Утонение следует определять по формуле (2.76) первоначально для срединного рифта, а затем – с уменьшением значения индекса k до тех пор, пока не выполнится условие (2.76). Удвоенное найденное значение k объявляется искомым и итерационная процедура на этом завершается. Если полученное число рифтов больше числа рифтов профиля, подлежащего изготовлению, то такой профиль можно считать технологичным.

В неравенствах (2.75) и (2.76) левые части содержат относительные утонения, которые получены в предположении, что материал заготовки – неупрочняемый. Фактически же большинство сплавов упрочняется, поэтому показатель экспоненты в формуле (2.74) фактически должен уменьшаться. Следовательно, реальные значения утонения должны быть несколько меньше расчетных, хотя погрешность, возникающая из-за данного допущения, может компенсироваться, например, за счет осреднения радиального давления.

Для обоих видов формовки итерационные процедуры определения числа переходов и числа рифтов легко формализуются и могут быть включены в автоматизированные системы проектирования. Однако эта модель неприменима для схем формовки, где формообразование осуществляют последовательно.

Рис. 2.16 иллюстрирует накопление утонения на трех предварительных переходах на основе соотношения (2.75) и различие утонения (по номерам рифтов k) для случая формообразования трапецевидных рифтов высотой 20 мм. Здесь величина $\delta C(j,k)$ соответствует накопленному утонению в процентах, а j – номеру перехода. Из рис. 2.16 следует, что если число рифтов не превышает десяти, то достаточно трех предварительных переходов при допустимом суммарном утонении, не превышающем 10%.

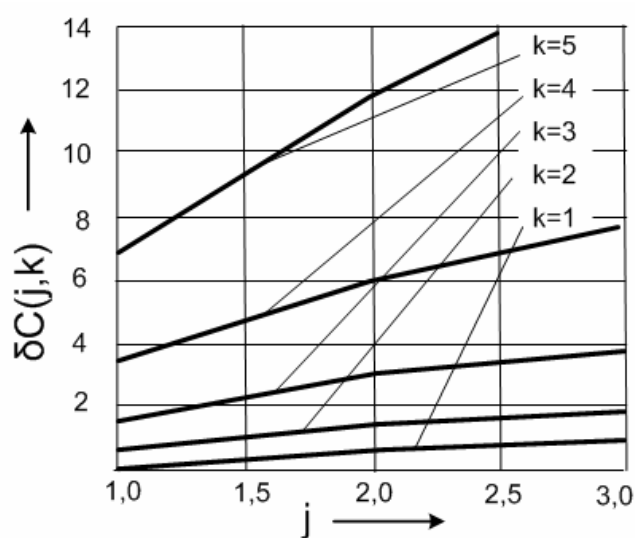


Рис. 2.16. Распределение суммарного утонения по переходам и рифтам

График, построенный на основе соотношения (2.76) и приведенный на рис. 2.17, можно использовать для определения допустимого числа рифтов, получаемых в рамках данной схемы при известном ограничении на величину допустимого утонения. Отложив по оси ординат величину допустимого утонения δ и найдя проекцию точки пересечения перпендикуляра, восстановленного в точке δ , с кривой на оси абсцисс, получим число рифтов, которое можно формовать.

Таким образом, построенная модель позволяет минимизировать число переходов для схемы формовки по сходящимся прямым по критерию утонения заготовки, а также определять число рифтов, подлежащих формовке, для схемы формовки по параллельным прямым на основе того же критерия.

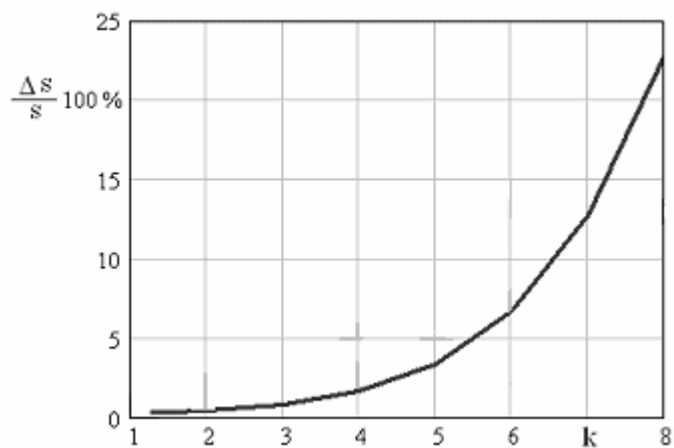


Рис. 2.17. Распределение утонения по ширине дна профиля (по рифтам)

Одновременная формовка рифтов в МИД обычно осуществляется при горизонтальном положении периферийных участков заготовки, а после формовки множественных рифтов в дне профиля оформляются угловые зоны и дальнейший процесс формообразования практически не отличается от изготовления профиля с узким дном и идентичными периферийными участками. Однако для профилей с широким гладким дном имеется возможность уменьшить число переходов за счет прогиба дна профиля [19, 140]. Отличие подходов в работах [19] и [140] заключается в том, что в первой работе эффект прогиба дна и протяженность зоны плавного перехода (ЗПП), зависящие от углов подгибки, определяются отдельно и только для швеллерного профиля из неупрочняющегося материала. В работе [140] материал заготовки считается упрочняющимся, а прогиб дна и протяженность ЗПП вычисляются на основе одной модели, причем возможно приведение конфигурации профиля с элементами жесткости к типовому профилю с гладкими полками на основе метода локальных жесткостей.

2.4. Зона плавного перехода и режимы подгибки элементов профиля

При МИД уменьшение числа переходов в сравнении с традиционным профилированием достигается за счет знакопеременной деформации подгибаемых полок профиля в отсутствие потери устойчивости элементов заготовки. Одним из существенных ограничений этой технологии является переформовка заготовки из-за больших углов подгибки элементов, при которых длина ЗПП простирается за пределы предшествующего перехода. При проектировании технологии эффект переформовки заготовки далеко не всегда удастся прогнозировать. Поэтому важной задачей является разработка модели ЗПП для упрочняющегося материала с целью выбора предельных углов подгибки, не допускающих переформовки заготовки [140].

Попытки построения модели ЗПП в предшествующий период подробно обсуждаются в работе [19], однако общим для них является то, что они не учитывают прогиб донной части профиля, проявляющийся при формовке широких профилей, а также изменение жесткости подгибаемой полки в случае формовки многоэлементных профилей.

Будем использовать вариационный метод, определив предварительно работу пластической деформации полки, угловой зоны и дна профиля [140].

Рассмотрим подгибаемую полку приведенных размеров, смежную с дном профиля (рис. 2.18) на одном из технологических переходах, опустив индексацию переходов. Будем считать, что в данном переходе (скажем, k -ом) угол подгибки равен θ_k , а в межклетьевом пространстве текущий угол подгибки является функцией $\theta(x_2)$. При этом следует иметь в виду, что к $(k-1)$ -ому переходу суммарный угол подгибки будет составлять α_{k-1} , а к k -му переходу – $\alpha_k = \alpha_{k-1} + \theta_k$. При подгибке полки примем следующие допущения: 1) материал заготовки – несжимаемый, упрочняемый по степенному закону; 2) ширина полки не изменяется, а срединная поверхность полки описывается линейчатой поверхностью; 3) пренебрегаем сдвиговыми деформациями в плоскости полки; 4) пренебрегаем размерами угловой зоны в сравнении с шириной полки.

Уравнение срединной поверхности полки в выбранной системе координат будет иметь вид:

$$x_1 - \frac{C}{2} = v \cdot \cos q(u), \quad x_2 = u, \quad x_3 = v \cdot \sin q(u), \quad (2.77)$$

где x_1, x_2, x_3 – декартовы координаты; C – ширина донной части профиля; v, u – криволинейные координаты.

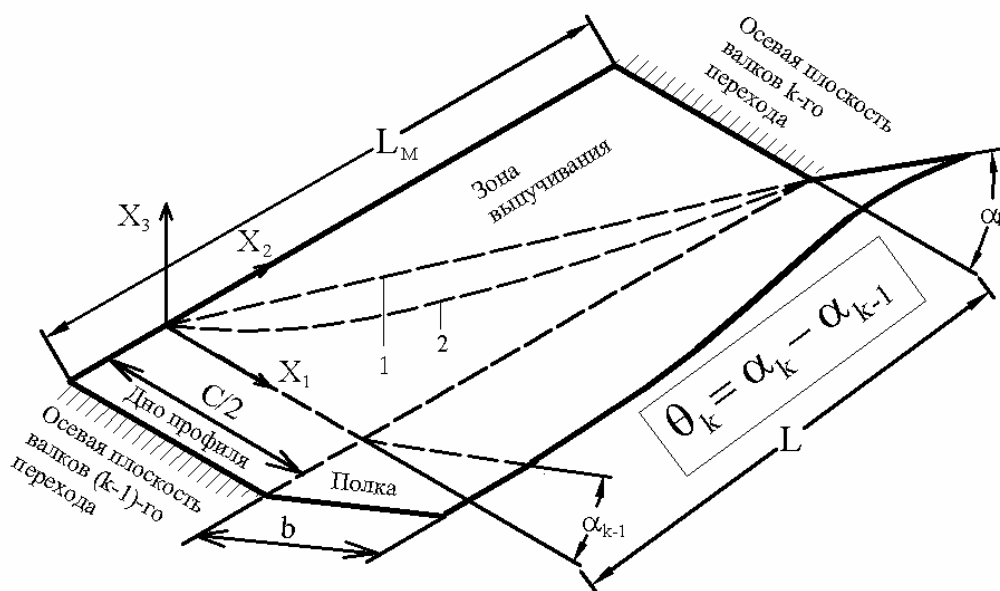


Рис. 2.18. Геометрия ЗПП и расположение локальной системы координат: 1 – аппроксимация реальной границы пластической области; 2 – реальная граница пластической области

Вычислим предварительно деформации полки при подгибке, для чего найдем коэффициенты первой квадратичной формы [141] ее срединной поверхности, задаваемой уравнениями (2.77):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial u} = 1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial q}{\partial u} \right)^2; \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 0; \quad G = \frac{\partial x_i}{\partial v} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 1, \quad (2.78)$$

где E, F, G – коэффициенты первой квадратичной формы.

Длина дуги dS в криволинейной системе координат дается выражением:

$$dS = \sqrt{E \cdot (du)^2 + 2F \cdot du \cdot dv + G \cdot (dv)^2}. \quad (2.79)$$

Продольная логарифмическая деформация e_u для точек, равноудаленных от зоны изгиба, с учетом формул (2.78) – (2.79) определяется так ($dv = 0$):

$$e_u = \ln\left(\frac{dS|_{dv=0}}{du}\right) = \ln(\sqrt{E}) = \frac{1}{2} \cdot \ln E. \quad (2.80)$$

Логарифмическая деформация e_v в направлении координаты v с учетом соотношений (2.78) – (2.79) вычисляется по формуле:

$$e_v = \ln\left(\frac{dS|_{du=0}}{dv}\right) = \ln(\sqrt{G}) = 0. \quad (2.81)$$

Учитывая допущение о несжимаемости материала, на основании формул (2.80) и (2.81) получаем деформации по толщине полки:

$$e_n = -e_u - e_v = -e_u. \quad (2.82)$$

Интенсивность деформаций e_i с учетом формулы (2.82) можно найти согласно работе [38]:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u}\right)^2\right). \quad (2.83)$$

Удельную работу деформации полки $A_n^{y\partial}$ с учетом степенного упрочнения [107] можно получить интегрированием приращения удельной работы:

$$A_n^{y\partial} = \int s_i \cdot de_i = \frac{1}{m+1} \cdot A \cdot e_i^{m+1} \approx \frac{A}{m+1} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u}\right)^2 \right]^{m+1}, \quad (2.84)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; A , m – параметры упрочнения; e_i – интенсивность деформаций, определяемая формулой (2.83).

При использовании метода интенсивного деформирования схема формовки предусматривает постоянную величину радиуса зон сгиба на каждом из переходов, что вовсе не означает отсутствие энергетических затрат, идущих на формообразование этих зон. Во-первых, в каждой клетке происходит нагружение будущих угловых зон по крайней мере до уровня пластического состояния; во-вторых, размер угловых зон изменяется уже в межклетьевом пространстве вследствие изменения угла подгибки. Поэтому сформулируем допущения для угловой зоны: 1) принимается схема плоской деформации ($e_u = 0$); 2) радиус кривизны срединной поверхности остается постоянным практически на всех этапах деформирования; 3) работа деформирования сжатой зоны равна работе деформирования растянутой зоны; 4) элементарные площадки при изгибе сохраняют свои площади:

$a \cdot r \cdot dr = a \cdot r_c \cdot dr_c$, где dr , dr_c – приращения радиусов кривизны вблизи произвольной точки и вблизи срединного слоя соответственно.

Координаты произвольной точки угловой зоны в межклетьевом пространстве задаются следующими соотношениями (рис. 2.19):

$$x_1 - \frac{C}{2} = r \cdot \sin\left(\frac{q(u)}{2} + g\right) - r_c \cdot \sin\left(\frac{q(u)}{2}\right); \quad x_2 = u; \quad x_3 = r_c - r \cdot \cos\left(\frac{q(u)}{2}\right), \quad (2.85)$$

где ρ – текущий радиус; ρ_c – радиус срединной поверхности угловой зоны; γ – текущий угол, отсчитываемый от биссектрисы угла.

Для определения деформаций найдем предварительно коэффициенты первой квадратичной формы с учетом соотношений (2.85):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial r} = 1, \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial g} = r \cdot \sin(q + 2g), \quad G = \frac{\partial x_i}{\partial g} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial g} = r^2. \quad (2.86)$$

Длина дуги для этого случая определяется формулой:

$$dS = \sqrt{E \cdot (dr)^2 + 2 \cdot F \cdot dr \cdot dg + G(dg)^2}. \quad (2.87)$$

Окружные логарифмические деформации с использованием зависимостей (2.86) и (2.87) вычисляются так:

$$e_g = \ln\left(\frac{dS|_{dr=0}}{dg \cdot r_c}\right) = \ln\left(\frac{r}{r_c}\right), \quad (2.88)$$

а радиальная компонента деформации с учетом третьего допущения вычисляется следующим образом:

$$e_r = \ln\left(\frac{dS|_{dg=0}}{dr_c}\right) = \ln\left(\frac{\sqrt{(dr)^2} \cdot r_c}{r \cdot dr}\right) = \ln\left(\frac{r_c}{r}\right). \quad (2.89)$$

Из формул (2.88) и (2.89) следует, что

$$e_r = -e_g. \quad (2.90)$$

Принимая во внимание первое допущение и формулу (2.90), можно установить, что для угловой зоны условие несжимаемости также выполняется.

Следуя логике вычисления удельной работы формообразования полки, найдем удельную работу деформирования угловой зоны:

$$A_{yz}^{y0} = \frac{A}{m+1} \cdot e_i^{m+1} \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_c}\right) \right)^{m+1}. \quad (2.91)$$

При подгибке полки происходит передача в донную часть профиля сил, заставляющих ее выпучиваться и приходить в пластическое состояние, причем, зона выпучивания обычно не простирается далее зоны плавного перехода. На рис. 2.18 показана

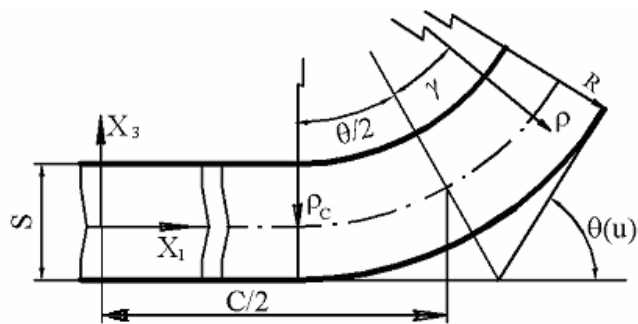


Рис. 2.19. Параметры угловой зоны

пластическая зона донной части профиля, для которой разумными являются следующие допущения: 1) работа выпучивания мала в сравнении с работой пластического сжатия; 2) длина пластической области в донной части профиля равна протяженности зоны плавного перехода подгибаемой полки; 3) боковые границы пластической области в донной части профиля близки по форме к ветвям некоей параболы, которые могут быть аппроксимированы линейной зависимостью с углом подгибки в качестве аргумента.

В этом случае удельную работу пластического деформирования дна профиля можно представить соотношением:

$$A_{\theta}^{y\partial} = \frac{A}{m+1} \cdot e_{np}^{m+1}, \quad (2.92)$$

где e_{np} – величина предельной упругой деформации.

Последующая задача состоит в определении полной работы пластической деформации полки, угловой зоны и донной части профиля. Полная работа формообразования полки определяется на основе формулы (2.84), полученной с учетом разложения в ряд Тейлора логарифмической функции (2.83) с удержанием члена первого порядка малости.

$$A_n^{полн} = \int_0^L \int_0^b \int_0^S A_n^{y\partial} dS \cdot dv \cdot du = W \int_0^L \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} du, \quad (2.93)$$

где L – протяженность зоны плавного перехода; S – толщина заготовки.

В формуле (2.93) величина W дается следующей формулой:

$$W = \frac{A \cdot S \cdot b^{2m+3}}{(m+1)(2m+3)} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1}. \quad (2.94)$$

Полная работа пластического деформирования угловой зоны вычисляется с использованием формулы (2.91):

$$A_{yz}^{полн} = 2 \int_0^b \int_{r_c}^R A_{yz}^{y\theta} \cdot r \cdot dr \cdot du = \frac{2A}{m+1} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1} \cdot \int_{r_c}^R \left[\ln \left(\frac{r}{r_c} \right) \right]^{m+1} \cdot r \cdot dr \cdot \int_0^L q(u) du, \quad (2.95)$$

где R – радиус кривизны наружного контура зоны сгиба.

В формуле (2.95) подынтегральное выражение, содержащее логарифм, может быть разложено в ряд Тейлора с удержанием первого члена ряда:

$$\ln \sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\frac{r}{r_c} \right)^i}{i \cdot \left(\frac{r}{r_c} \right)^i} \right] \approx \frac{r - r_c}{r}. \quad (2.96)$$

Анализ соотношения (2.96) при $r = R$ показывает, что второй и несколько последующих членов не превышают в сумме 10% от величины первого члена. Учитывая также, что m существенно меньше единицы, интеграл, содержащий логарифмическую функцию, после проведения интегрирования принимает следующее значение ($R \gg r_c + S/2$):

$$\int_{r_c}^R \left[\ln \left(\frac{r}{r_c} \right) \right]^{m+1} \cdot r \cdot dr \approx \frac{1}{m+1} \cdot \left(\frac{S}{2} \right)^{2+m}. \quad (2.97)$$

Принимая во внимание формулу (2.97), полная работа пластического деформирования угловой зоны обретает вид:

$$A_{yz}^{полн} = Y \cdot \int_0^L q(u) \cdot du, \quad (2.98)$$

$$\text{где } Y = \frac{2A}{1-m^2} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1} \cdot \left(\frac{S}{2} \right)^{m+2}.$$

Полная работа пластического деформирования донной части профиля с учетом формулы (2.92) и допущения об аппроксимации границы пластической области принимает следующий вид:

$$A_{\partial}^{полн} = \int_0^L Z \cdot q(u) \cdot du, \quad (2.99)$$

$$\text{где } Z = \frac{A}{m+1} \cdot e_{np}^{m+1} \cdot S \cdot h \quad (\text{здесь } h = C/(2 \cdot q_k) \text{ согласно третьему допущению}).$$

Полная функция работ для правой половины профиля определяется на основе формул (2.93), (2.98) и (2.99):

$$A^{полн} = \int_0^L \left[W \cdot \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} + (Y + Z) \cdot q(u) \right] \cdot du . \quad (2.100)$$

Теперь надлежит решить вариационную задачу с подвижной границей:

$$dA^{полн} = d \int_0^L \xi(\dot{q}, q, u) \cdot du , \quad (2.101)$$

где ξ равно подынтегральной функции в формуле (2.100).

Решение задачи (2.101) сводится к интегрированию уравнения Эйлера [142]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial q} - \frac{d}{du} \left[\frac{\partial \xi}{\partial \dot{q}} \right] = 0 ,$$

которое принимает следующий вид:

$$\frac{d \left(\dot{q} \right)^{2m+1}}{du} = z , \quad (2.102)$$

$$\text{где } z = \frac{Y + Z}{W \cdot (2m + 2)} .$$

Решение дифференциального уравнения (2.102) в окончательном виде представляется функцией:

$$q(u) = D \cdot (z \cdot u + C_1)^B + C_2 , \quad (2.103)$$

где C_1, C_2 – константы, подлежащие определению.

$$\text{Здесь } D = \frac{2m+1}{z \cdot (2m+2)} , \quad B = \frac{2m+2}{2m+1} .$$

Граничные условия для определения констант в решении (2.103) формулируются таким образом:

$$q(u) \big|_{u=0} = 0; \quad \frac{dq}{du} \big|_{u=0} = 0 .$$

После удовлетворения указанным граничным условиям решение (2.103) приобретает вид:

$$q(u) = D(z \cdot u)^B . \quad (2.104)$$

Для определения протяженности ЗПП необходимо использовать условие $q(u) \big|_{u=L} = q_k$, откуда следует:

$$L = \left(\frac{q_k}{D} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{z}. \quad (2.105)$$

Рассмотрим предельные случаи для модели (2.105). Если положить $C = 0$ ($Z = 0$), то получаем модель Гуна-Полухина для формовки уголка из упрочняющейся полосы [111]. Полагая $m = 0$ (неупрочняющийся материал заготовки), легко показать, что предлагаемая модель в точности совпадает с моделью Бхаттачария-Коллинза [125] и с моделью ЗПП при стесненном изгибе для случая формовки изотропной полосы с постоянным радиусомгиба и одинаковым средним диаметром формующих роликов смежных переходов [143].

Рис. 2.20 иллюстрирует использование модели (2.105) применительно к изготовлению швеллерных профилей с шириной дна 50 и 100 мм из стали 08кп толщиной 1 мм при различных углах подгибки.

Как видно из графиков, широкое дно профиля приводит к уменьшению длины ЗПП, что вполне согласуется с исследованиями прогибов донной части профилей в работе [19], где впервые было обращено внимание на эффект «ослабления» углов подгибки, связанный с прогибом дна профиля. На рис. 2.21 приведены модельные зависимости в сравнении с эксперимен-

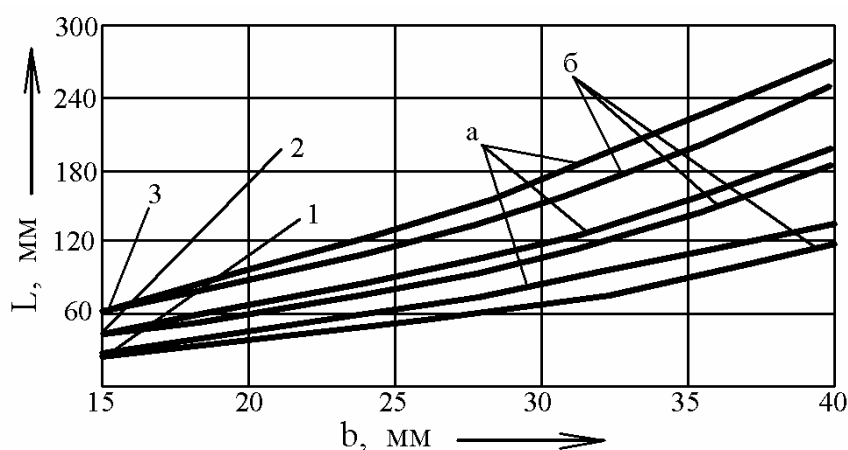


Рис. 2.20. Зависимость ЗПП от ширины полки: 1, 2, 3 – углы подгибки, равные 15° , 30° и 45° соответственно; а – $C = 50 \text{ мм}$; б – $C = 100 \text{ мм}$

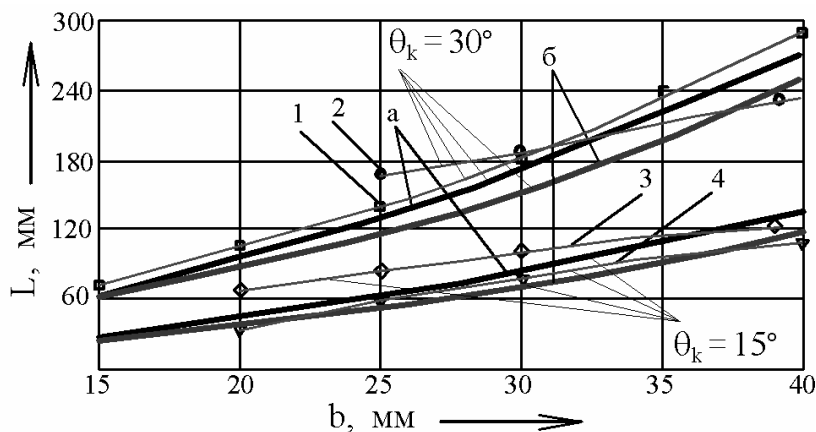


Рис. 2.21. Модель ЗПП и опытные данные:

- экспериментальные данные автора: 1 – сталь 08кп; $S = 0,6 \text{ мм}$; $C = 0$; 4 – сталь 08кп; $S = 0,6 \text{ мм}$; $C = 110 \text{ мм}$;
- экспериментальные данные согласно работе [111]: 2, 3 – сталь 10; $S = 0,55 \text{ мм}$; $C = 0$;
- расчетные данные: а – сталь 08кп; $S = 0,55 \text{ мм}$; $C = 50 \text{ мм}$; б – сталь 08кп; $S = 0,55 \text{ мм}$; $C = 100 \text{ мм}$

тальными данными. Отсюда видно, что имеет место достаточно хорошая сходимость теоретических и опытных данных. Экспериментальные данные получены авторами по методике, описанной в работе [19], а данные, приведенные в работе [111], получены с применением тензометрирования (датчики наклеивались с двух сторон полосы во избежание влияния изгиба полки). Следует заметить, что сравнение протяженности ЗПП для различных технологий не всегда возможно: схемы формовки, диаметры катающих роликов и их конструкция, а также режимы формообразования могут отличаться, оказывая тем самым существенное влияние на исследуемый параметр. Даже межклетьеовое расстояние профилировочного станка может оказывать некоторое влияние на данный параметр. Замечено, что при увеличении межклетьеового расстояния в два раза (незадействованная промежуточная клеть) длина ЗПП уменьшается на (2 – 5)% для случая тонкостенных профилей типовой номенклатуры, что связано с прогибом не только донной части профиля, но и всего профиля в указанном промежутке.

Заниженное межклетьеовое расстояние L_M профилировочного станка может ограничивать технологические возможности последнего. Как указывалось выше, при разработке технологии надлежит следить за тем, чтобы применяемые углы подгибки не выводили длину ЗПП за пределы межклетьеового расстояния, то есть должно выполняться условие: $L \leq L_M$. Тогда предельный угол подгибки полки $q_k^{пред}$ за один технологический переход можно найти из трансцендентного уравнения:

$$\left(\frac{q_k}{D}\right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{z} - L_M = 0.$$

Таким образом, при разработке технологии должно учитываться условие:

$$q_k \leq q_k^{пред}, \quad (2.106)$$

где θ_k – угол подгибки, назначаемый в k – ом переходе.

Однако условие (2.106) должно строго соблюдаться только при формовке уголков и

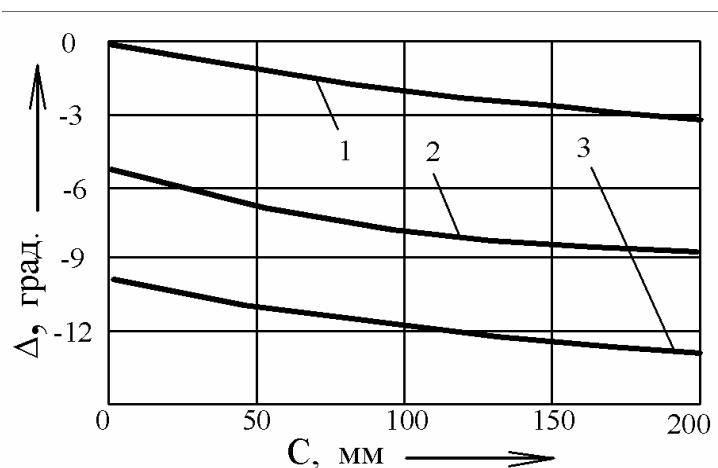


Рис. 2.22. Зависимость углов «ослабления» от ширины дна профиля: 1, 2, 3 – углы подгибки, равные 15°, 30° и 45° соответственно

профилей с узкой донной частью. Как видно на рис. 2.20 и 2.21, длина ЗПП профилей с широкой донной частью несколько меньше, чем узких профилей. Используя разработанную модель, можно получить количественную зависимость между углами «ослабления» и шириной дна профиля, используя программирование данной задачи, например, в среде MathCAD-2001 Pro.

Результаты работы такой программы приведены на рис. 2.22 и 2.23. Программа предусматривает вычисление длины ЗПП с базовым значением ширины дна C_6 ($C_6 \approx b$), затем образуется невязка между $L(C_6)$ и длиной ЗПП с заданным значением ширины дна. Невязка подвергается процедуре нахождения соответствующего угла подгибки и выводит в форме графика углы «ослабления», т.е. можно установить разность по углу, которая добавляется к углу подгибки в данном технологическом переходе (для формовки профиля с заданной шириной дна). При этом отсутствие переформовки гарантируется. Ясно, что увеличение углов подгибки в ряде переходов позволит уменьшить число переходов и использовать малогабаритные профилировочные станки с небольшим числом клеток [19].

При необходимости анализа скоростного режима зависимость угла подгибки от координаты u (2.104) может быть сведена к зависимости угла подгибки от времени заменой $u = V \cdot t$, что допускает определение продольной деформации полки в любой момент времени на основе формул (2.78), (2.80) и (2.104), а также интенсивности деформаций.

При формовке многоэлементных, в том числе полужакрытых профилей, подгибаемая полка обладает большей жесткостью за счет «надстройки», чем гладкая полка. В этом случае необходимо учитывать жесткость элементов, которые несет основная полка. Учет изменения жесткости полки можно производить с использованием метода «локальных жесткостей» по которому

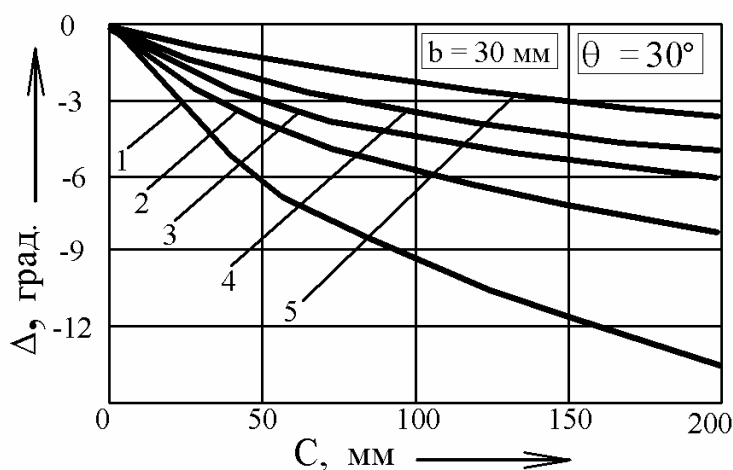


Рис. 2.23. Зависимость углов «ослабления» от ширины дна профиля: 1, 2, 3, 4, 5 – толщина заготовки $S = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ мм соответственно

подсчитывают характеристики жесткости соответствующего участка заготовки на предшествующем переходе, а затем определяется толщина эквивалентной гладкой полки той же ширины. Дальнейшие технологические расчеты с использованием предлагаемой модели не отличаются от описанной выше процедуры, однако для некоторых видов потери устойчивости полузакрытых профилей необходимо экспериментальное подтверждение теоретических результатов.

Таким образом, разработанная модель ЗПП, учитывающая упрочнение металла и прогиб донной части профиля при формообразовании, позволяет гарантировать отсутствие переформовки заготовки путем ограничения углов подгибки полок полузакрытого профиля, а также сократить число переходов.

2.5. Устойчивость формообразования полузакрытых профилей

Основные проблемы устойчивости формообразования полузакрытых профилей, как было указано в разд. 1 книга, заключаются в локальной потере устойчивости периферийных элементов преимущественно в форме кромковой волнистости, бокового выпучивания и излома полки. Если другие дефекты заготовки (см. разд. 1.6) обусловлены в основном ошибками проектирования, изготовления и настройки и могут быть предотвращены с помощью технических мероприятий, то обеспечение устойчивости профилирования относится к принципиальным вопросам разработки схем формообразования. Если при изготовлении МИД профилей открытого типа (например, швеллеров) предупреждение кромковой волнистости обеспечивается натягом полки или применением межклетевой проводки, то при производстве полузакрытых профилей можно только использовать межклетьевые проводки качения в связи с повышением контактных напряжений из-за элементов жесткости. Однако вместо натяга полки можно обеспечить знакопеременную продольную деформацию полок настройкой клеток или надлежащим выбором соотношения диаметров роликов по переходам, изменяя значение углов выхода заготовки из роликового калибра.

Влияние угла выхода заготовки из калибра на остаточную plasti-

ческую деформацию под- гибаемых полок.

В межклетьевом пространстве между $(k - 1)$ -ым и k -ым переходами заготовку можно разделить на зону пластического шарнира 1, зону упругого состояния 2, зону плавного перехода 3 и контактную зону 4 (рис. 2.24). В зависимости от угла выхода профиля из калибра $k-1$ перехода подгибаемые полки при-

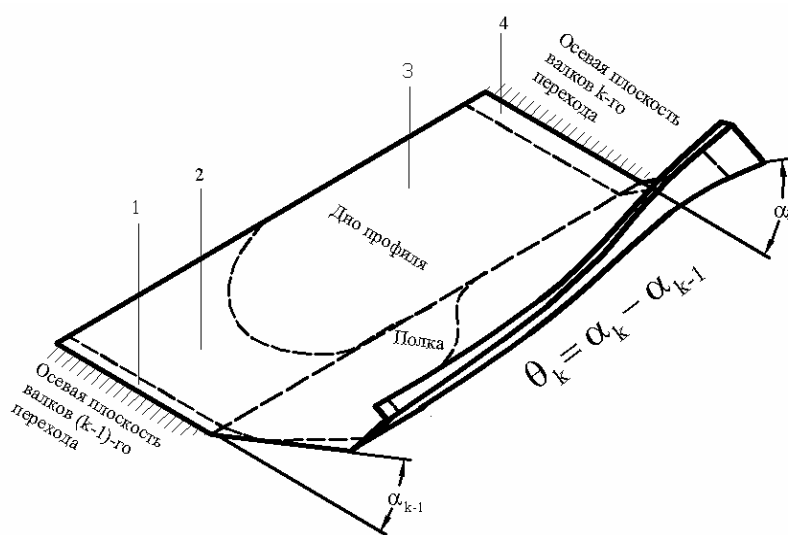


Рис. 2.24. Зоны заготовки С-образного профиля в межклетьевом пространстве: 1 – зона пластического шарнира; 2 – зона упругого состояния; 3 – зона плавного перехода; 4 – контактная зона

обретают в первой зоне различные продольные пластические деформации. При МИД задача состоит в уменьшении уровня сжимающих напряжений подгибаемых полок (соответственно, уменьшении пластических деформаций растяжения) в межклетьевом пространстве. Соответствующие напряжения по выходу из калибра представлены на рис 2.25. Отсюда следует, что изменение угла выхода в сторону подгибаемых полок делает их менее подверженными потере устойчивости.

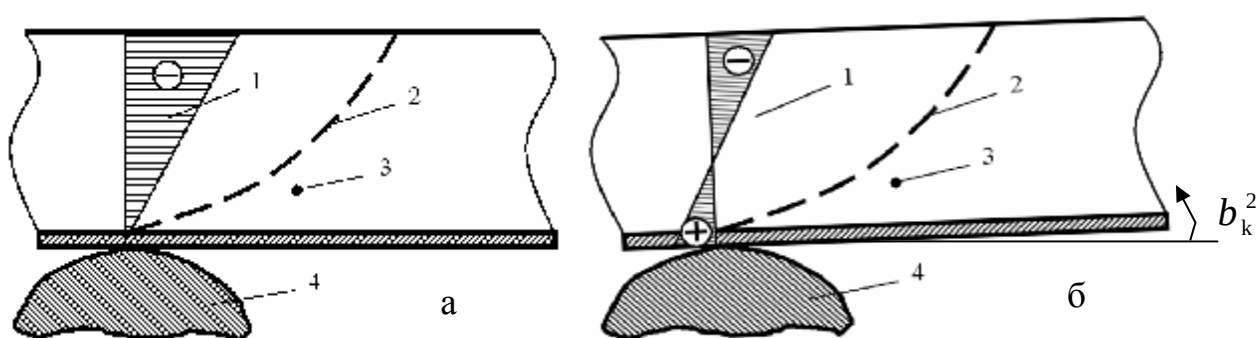


Рис. 2.25. Влияние угла выхода профиля из калибра на изменение распределения напряжений: а – напряжения полки при нулевом угле выхода; б – напряжения полок и донной части профиля при угле выхода, отличном от нулевого: 1 – эпюра напряжений; 2 – контур верхнего ролика; 3 – профиль; 4 – нижний ролик

Заготовка приобретает продольные пластические деформации растяжения в третьей и четвертой зонах, а в первой зоне следующего межклетьевого

промежутка возможно их уменьшение за счет угла выхода заготовки из калибра. Эти вопросы достаточно подробно изложены в работах [19, 27]]

Изменение формы линии профилирования существенно влияет на деформационные характеристики подгибаемых полок, так что зависимость деформации в зоне пластического шарнира можно задать формулой:

$$e_k^b = \ln(1 - h_k^1 \cdot b_k^1)(1 - h_k^2 \cdot b_k^2), \quad (2.107)$$

где h_k^1, h_k^2 – коэффициенты, определенные в работе [19]; b_k^1, b_k^2 – углы захода и выхода профиля в k -ом переходе.

Углы захода профиля в калибр влияют на продольную деформацию подгибаемых полок незначительно: даже при увеличении угла до 20 % значение продольной деформации едва достигает 0,5 % [19]. Углы выхода оказывают существенно большее влияние на продольную деформацию (рис. 2.26). Наряду с углами подгибки они представляет собой достаточно эффективный инструмент воздействия на продольные деформации полок, а следовательно, и на условия, обеспечивающие отсутствие потери устойчивости заготовки в межклетьевом пространстве.

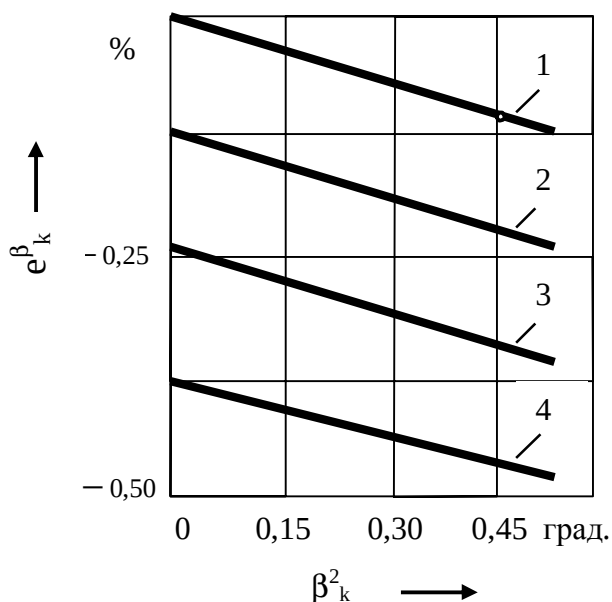


Рис. 2.26. Зависимость деформаций кромки от угла выхода β_k^2 : 1 – $\beta_k^1 = 0^\circ$, 2 – $\beta_k^1 = 1^\circ$, 3 – $\beta_k^1 = 2^\circ$, 4 – $\beta_k^1 = 3^\circ$.

Очевидно, суммарную деформацию к $(k+1)$ -му переходу можно определить (ввиду ее аддитивности) суммированием деформаций полок (2.107) на всех предшествующих переходах:

$$e_k^\Sigma = \sum_{i=1}^k e_i, \quad (2.108)$$

где e_i – полная деформация полки.

Суммарная деформация (2.108) при надлежащем изменении углов выхода заготовки из калибра уменьшается ввиду разных знаков слагаемых деформаций (2.107). Дело в том, что при МИД в осевой плоскости валков и прилегающих к ней узких участках в продольном направлении возникает

пластический шарнир [19], где деформирование заготовки продолжается и за осевой плоскостью по ходу движения профиля. Примерный характер распределения продольных деформаций в многоэлементных профилях представлен на рис. 2.27, откуда следует, что сжимающие продольные напряжения кромки периферийного элемента в межклетьевом пространстве, которые могут приводить к потере устойчивости в форме кромковой волнистости, зависят не столько от деформации ϵ_2 , сколько от разности $(\epsilon_2 - \epsilon_1)$.

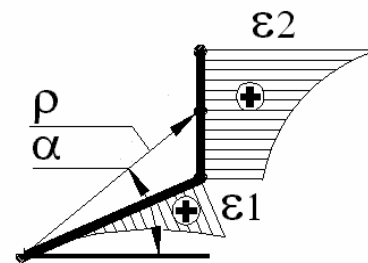


Рис. 2.27. Продольные деформации в многоэлементных профилях

Кроме того, при оценке потери устойчивости в виде выпучивания или изломов полок следует учитывать характеристики локальной жесткости элементов профиля.

Кромковая волнистость периферийного элемента, в отличие от работы [19], где рассматривается полка с учетом жесткости дна, описывается с помощью функции отклонения точек элемента от его плоского участка:

$$w(r, z) = f \cdot \frac{r}{b_n} \cdot \sin \frac{m \cdot p \cdot z}{a}, \quad (2.109)$$

где f – амплитуда волны на кромке; r – текущая локальная координата в направлении, перпендикулярном к кромке заготовки; b_n – ширина периферийного элемента профиля; m – число полуволн при потере устойчивости; z – координата в направлении профилирования; a – шаг волны.

Продольную деформацию кромки, соответствующую потере устойчивости с параметрами, заданными формулой (2.109), можно вычислить так:

$$e_{\max} = \ln \left(\frac{A}{a} \right) \cdot 100 \%, \quad (2.110)$$

где A – длина синусоиды на ее периоде (шаге) волны.

Длина синусоиды определяется зависимостью:

$$A = \frac{2 \cdot a}{p} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot p \cdot f}{a} \right)^2} \cdot E \left(\frac{p}{2}, x \right), \quad (2.111)$$

где $E(p/2, x)$ – эллиптический интеграл второго рода; $x = \sqrt{\frac{2 \cdot f^2 \cdot p^2}{a^2 + 2 \cdot f^2 \cdot p^2}}$.

На рис. 2.28 представлена взаимосвязь продольной деформации кромки (2.110) периферийного элемента профиля и параметров кромковой волнистости, входящих в формулу (2.109). Следует отметить, что речь идет об остаточных пластических деформациях.

Если техническими условиями на поставку про-

филя определены предельно допустимые параметры шага и амплитуды кромковой волнистости (см. раздел 1.6), то можно вычислить предельно допустимую деформацию кромки численным методом с использованием формул (2.111) и (2.110). Однако значение предельно допустимой деформации является более слабым ограничением, чем критическая деформация, приводящая к кромковой волнистости. Значение критической деформации в приложении к периферийному элементу на основании работы [27] можно представить в виде:

$$e_k^{cr} = \left[\left(k^* \cdot l \right)^2 \cdot \frac{n \cdot E}{K} \cdot \left(\frac{s}{b_n} \right)^4 \right]^{\frac{1}{n+1}}, \quad (2.112)$$

где k^* – коэффициент, учитывающий условия закрепления краев периферийного элемента; E , m – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; K , n – параметры кривой упрочнения; s – толщина стенок профиля; $l = \frac{p^2}{12 \cdot (1 - m^2)}$.

Коэффициент, учитывающий условия закрепления краев периферийного элемента (один край зажат, другой – свободен), принято брать равным 3,6 по Работнову [117].

Тогда условие предотвращения кромковой волнистости на основании формул (2.108) и (2.112) может быть представлено в виде:

$$e_k^{\Sigma} < e_k^{cr}. \quad (2.113)$$

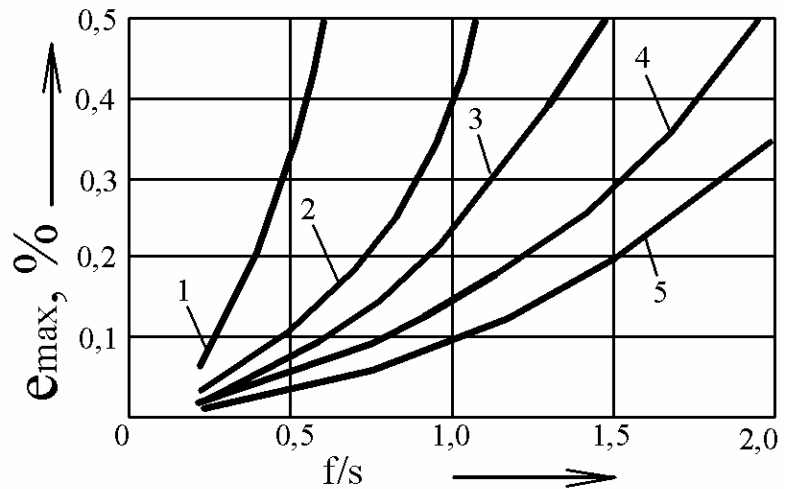


Рис. 2.28. Взаимосвязь деформации кромки и параметров кромковой волнистости: 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям $b/s = 30; 50; 70; 90; 110$

Условием (2.113) можно пользоваться для практических целей при разработке технологии, когда периферийные элементы расположены почти вертикально. В случае, когда периферийные элементы расположены на подгибаемых полках, изучение условий потери устойчивости можно производить на основе полного факторного эксперимента (см. раздел 3). Что же касается критериев потери устойчивости в форме выпучивания или излома кромки, то это требует учета характеристик локальной жесткости заготовки и более фундаментальных исследований, выходящих за рамки настоящей работы. Некоторые из этих вопросов в практическом аспекте, тем не менее, рассматриваются в разделе 3 книги.

Выводы

1. Разработанный конструктивно-технологический классификатор полужакрытых профилей, учитывающий симметрию сечения, элементы жесткости, толщину, виды перфорации, свойства материала и вид покрытия, позволяет более систематично подходить к исследованию и совершенствованию технологии производства таких профилей.

2. Построенная модель изменения толщины заготовки, учитывающая различие схем нагружения на предварительных и окончательных переходах, позволяет производить уточненный расчет ширины заготовки.

3. Разработанная на основе инженерного метода модель, учитывающая упрочнение металла по линейному закону, показывает, что наличие упрочнения увеличивает смещение НСН примерно в два раза по сравнению с неупрочняемым материалом. При малых радиусах изгиба ($r/s_0 < 1$) напряжения в упрочняемом материале вблизи контуров зоны изгиба превышают более чем на 20% соответствующие напряжения в неупрочняемом металле.

4. Результаты решения методом прямого интегрирования задачи о подсадке полки показывает, что распределение касательных напряжений вблизи внутреннего контура имеет вид двугорбой кривой, причем, при напряжении торцевого поджатия на уровне $0,7 \sigma_s$ внутренний контур зоны изгиба имеет склонность к складкообразованию.

5. Разработанная модель формовки множественных рифтов/гофр позволяет определить допустимое количество рифтов, формируемых на одном переходе на основе критерия предельного утонения заготовки для случая

схемы формовки по параллельным прямым. Для схемы формовки по сходящимся прямым по критерию утонения заготовки построенная модель позволяет минимизировать число переходов.

6. Полученное вариационным методом решение задачи о формообразовании профиля из упрочняемой полосы является асимптотически корректным и позволяет определять протяженность ЗПП и углы «ослабления» в случае формообразования полужакрытых профилей с широким дном. На величину найденных углов «ослабления» можно увеличивать текущие углы подгибки (принятые как для схемы формовки с абсолютно жестким дном) и тем самым уменьшить на один-три перехода число технологических переходов. На основе данной модели можно также определять предельные углы подгибки по критерию отсутствия переформовки заготовки.

7. Сформулированные условия отсутствия потери устойчивости по допускаемым параметрам кромковой волнистости позволяют назначать более жесткие режимы деформирования и тем самым уменьшить число переходов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Для обеспечения надежности технологии результаты предыдущего раздела подлежат проверке. Учитывая значительные затраты на проведение экспериментальных работ, последние выполнялись при отработке технологии изготовления полузакрытых профилей в ОАО «Ульяновский НИАТ» и НПО «ИДМ» по заказам промышленных предприятий с изменением схем и режимов их формообразования. Результаты отработки технологии и экспериментальные данные отражались в журналах технологической отработки в виде соответствующих протоколов.

Задачи экспериментальных исследований:

- проверка теоретических моделей;
- изучение особенностей схем формообразования полузакрытых профилей и выработка соответствующих рекомендаций для разработчиков технологии;
- исследование влияния режимов формообразования на качество профилей.

3.1. Исследуемые профили, оснащение и методы исследования

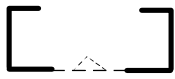
Основные факторы пластического формоизменения заготовки при формообразовании полузакрытых профилей:

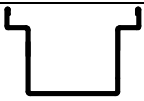
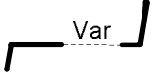
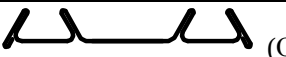
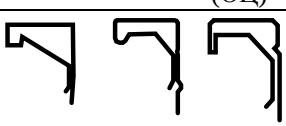
1. Характеристики сечения исходного профиля: его формы и размеры;
2. Характеристики заготовки, схем и режимов формообразования;
3. Межклетьевое и межосевое расстояние, число клеток станка.

Исследуемые профили приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Номенклатура полузакрытых профилей для экспериментального исследования

№	Тип профиля, покрытие	Характеристики сечения, мм
1	 (ОЦ)	35x27x15x12x1,5
2	 (ОЦ)	29,5x28,5x12x1,0
3	 (ОЦ, ОЦ+ЛКП)	145(50...210)x45x15x(0,7-1,5), 200x80x20x2, 30x30x5x1,5, 30x30x8x(2,5-3), 18x20x6x(1,2-1,5), 50x50x6x0,55, 75x50x6x0,55, 100x50x6x0,55, 60x35x10x0,6
4	 (ОЦ+ЛКП)	37x7x12x0,7

№	Тип профиля, покрытие	Характеристики сечения, мм
5	 (ОЦ+ЛКП)	85x55x0,85
6	 (ОЦ)	37x36x1,5
7	 (ОЦ+ЛКП)	90(var)x22x38x10x0,8
8	 (ОЦ)	80(var)x27x10x1,2(0,8)
9	 (ОЦ)	110x77x2,0
10	 (ОЦ)	35x20x1,5
11	 (ОЦ+ЛКП)	14x20x8x0,6
12	 (ОЦ+ЛКП)	45x15,1x0,7
13	 (ОЦ+ЛКП)	27,7x25x27x0,7
14	 (ОЦ+ЛКП)	34,4x40,5x14,4x3x0,7
15	 (ОЦ+ЛКП))	55x7x0,7; 54,3x9x0,7
16	 (ОЦ+ЛКП)	15,4x20,6x15,6x0,6
17	 (ОЦ)	108x86x60x1,5
18	 (ОЦ)	20,4x22,6x0,7 29x34x0,8 20x27x0,7

Выбор материалов для экспериментальных работ был продиктован наиболее востребованными рынком типоразмерами полужакрытых профилей, определенных для исследования также в разделе 2 книги. Поэтому материалами заготовок преимущественно являлись стали групп 03 – 08 толщиной от 0,5 до 2 мм с цинковым, лакокрасочным и полимерным покрытием или без покрытия. Химический состав и механические свойства наиболее применяемых сталей приведены в табл. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2

Химический состав стали СтЗсп (ГОСТ 380-71), 08(кп,сп) (ГОСТ 503-81)

Сталь	Химические элементы, входящие в состав стали								
	Углерод (C)	Кремний (Si)	Медь (Cu)	Мышь (As)	Марганец (Mn)	Сера (S)	Фосфор (P)	Никель (Ni)	Хром (Cr)
	Не должно превышать, %								
Зсп	0,14-0,22	0,12-0,30	–	–	0,4-0,65	0,05	0,04	–	0,3
08 (кп, сп)	0,05-0,12	0,03	0,25	0,08	0,25-0,50	0,04	0,035	0,25	0,10

Таблица 3.3

Механические свойства сталей СтЗсп, 08(кп,сп) (ГОСТ 503-81)

Марка стали	Относительное удлинение, δ_5 , %, не менее	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, σ_T , МПа
Ст Зсп	26	380 – 490	250
Ст 08кп	23	250 – 360	175

Оснащение для проведения экспериментальных работ, включающее оборудование, технологическую оснастку, средства измерения и регистрации, приведено в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Оборудование, инструменты и приборы экспериментальных исследований

№	Наименование	Назначение	Примечание
1.	Ножницы дисковые ДИН-600, гильотинные ножницы	Подготовка заготовок	**
2.	Станки профилировочные*	Профилирование заготовок	**
3.	Экспериментальная оснастка	Исследование схем формообразования	**
4.	Наборы щупов № 2, № 4	Замер зазоров в роликах	ГОСТ 882-75
5.	Пресс ПИГПЛУ-1	Физическое моделирование потери устойчивости заготовок	**
6.	Устройство для оценки прочности покрытия	Качество покрытия профилей	**

№	Наименование	Назначение	Примечание
7.	Устройство для измерения прогибов с индикатором часового типа (ИЧТ)	Измерение прогибов профиля	ГОСТ 577-68 (ИЧТ)
8.	Штангенциркули ШЦ-I, ШЦ-III	Измерение линейных параметров заготовок, оснастки	ГОСТ 166-80
9.	Наборы радиусных шаблонов № 1, № 3	Замер радиуса кривизны заготовки и радиусов скругления роликов	ГОСТ 4126-82
10.	Прибор МПБ-2	Измерение линейных размеров	
11.	Прибор ПМТ-3	Измерение твердости	
12.	Микроскоп МИМ-8	Изучение микроструктуры	
13.	Цифровой фотоаппарат Canon-700A, сканер HP Scanjet 3570c	Фотографии и изображение образцов	
14.	Компьютер Pentium-III	Ведение базы данных, статистическая обработка результатов, выполнение расчетов	
* – станки семейств ГПС («НИАТ») и СПУ («ИДМ»); * – нестандартные			

Вспомогательные средства и другое оснащение приводятся по ходу описания экспериментальных работ.

Основные направления и применяемые методы исследований приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5.

Направления исследований и применяемые методы

Направления исследований	Применяемые методы
1. НДС угловой зоны и влияние ширины заготовки; 2. Формовка рифтов в донной части профиля; 3. Поведение заготовки в межклетевом пространстве и потеря устойчивости; 4. Схемы формообразования полузакрытых профилей; 5. Качество формуемых профилей.	1. Геометрические методы измерения линейных и угловых величин; 2. Косвенный метод оценки продольных деформаций; 3. Метод измерения твердости по Виккерсу; 4. Металлографические методы исследования; 5. Методы статистического анализа; 6. Метод конечных элементов.

3.2. Исследование угловых зон и ширина заготовки

3.2.1. Изменение толщины в угловых зонах

Полученные в разд. 2.2 зависимости (2.30) и (2.31) подлежат экспериментальной проверке для типовых схем формообразования полузакрытых профилей. Для исследования были отобраны первоначально полузакрытые профили несимметричного сечения с числом зон перетяжки от одной до трех (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Профили, используемые при исследовании

№	Сечение профиля	Размеры, мм	Материал	Применение
1.		35×27×1,5	08пс	Мебельный профиль
2.		42×28,5×1,0	08пс	Мебельный профиль

При этом следует учитывать схемы формообразования (рис. 3.1), соответствующие схемам нагружения рис. 2.3 в зависимости от переходов, поскольку суммарный эффект существенно зависит от их реализации на практике [133].

Учитывая малость размеров угловых зон, замеры их параметров проводили на микрошлифах, описание приготовления которых приведено ниже. Образцы профилей больших размеров разрезали на части (сегменты) для формирования шлифа приемлемых размеров (не более 60 – 80 мм в диаметре). При этом в состав шлифа включали образец из исходного материала (или формировали отдельный шлиф с образцами исходного недеформированного материала). Высота образцов не превышала 10 – 12 мм. При вырезании образцов избегали их существенного нагрева или наклепа. Образцы помещали в оправки-кольца круглой или эллипсовидной формы

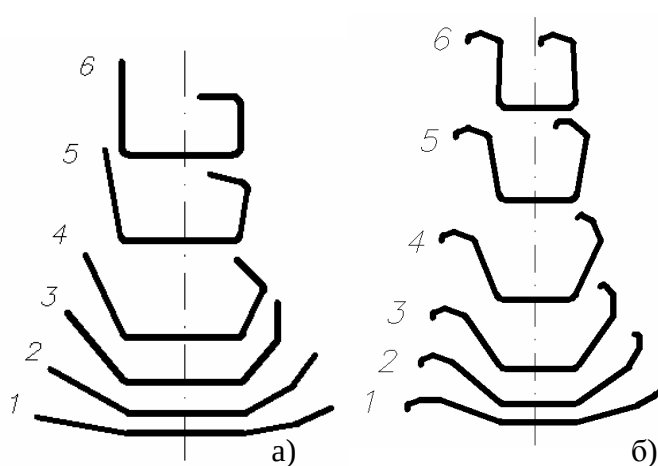


Рис. 3.1. Схемы формообразования профилей: а – профиль №1; б – профиль №2 (табл. 3.6)

и заливали серой или быстротвердеющим сплавом протокриловой группы, который применялся в большинстве случаев, поскольку сера, ввиду ее легкоплавкости, пачкает поверхность шлифа при дальнейшей обработке. Шлифование и полирование образцов производили абразивным материалом (порошками, пастой), абразивным инструментом (шлифовальные круги, бруски, шлифовальная шкурка) вручную или на шлифовально-полировальных машинах (рис. 3.2) с применением паст и соблюдением температурных режимов (отсутствие существенного нагрева). Механическое шлифование образцов обычно проводили в три прохода с последующим полированием.

На рис. 3.3 показано разделение образцов на сегменты, точки замеров, а также шлифы, на которых проводились измерения. Наибольший интерес для изучения представляют точки 2 и 3 профиля № 1 (рис. 3.3, б) и точки 8 и 9 профиля № 2 (рис. 3.3, д) (см. табл. 3.6), для которых изменение толщины обусловлено особенностями их схем формообразования (см. рис. 3.1).



Рис. 3.2. Шлифовально-полировальный станок

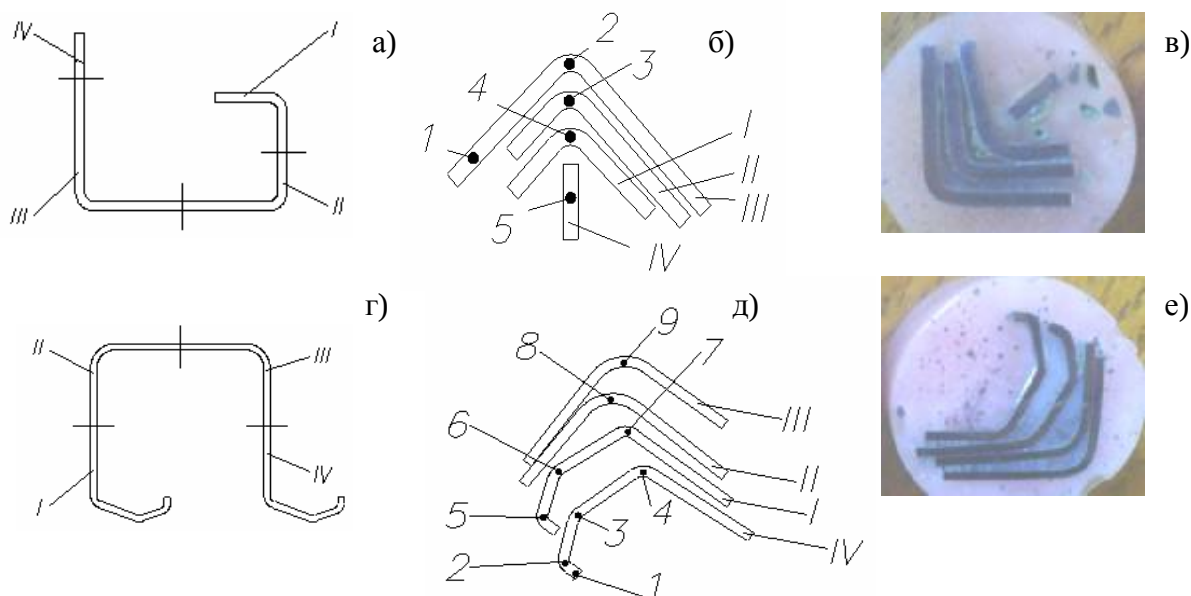


Рис. 3.3. Сегменты и точки замеров толщины: а, г – разделение профилей №1 и №2 на сегменты соответственно; б, д – расположение точек по сегментам профилей №1 и №2 соответственно; в, д – шлифы сегментов профиля № 1 и № 2 соответственно

Замеры толщины элементов профиля производили на приборе МПБ-2 (для предварительной оценки) и ПМТ-3М (рис. 3.4). Результаты измерений с точностью до 0,01 мм сведены в табл. 3.7.

Результаты расчета по зависимостям (2.30) и (2.31) для указанных характерных точек, прилегающих к базовому элементу, профилей № 1 и № 2 представлены на рис. 3.5 и 3.6. На рис. 3.5 приведено изменение толщины заготовки в зонах изгиба в процентном отношении для каждого из переходов, а на рис. 3.6 показано суммарное значение изменения толщины заготовки с указанием влияния каждого перехода на формирование данной величины.

Таблица 3.7

Результаты измерения толщины в точках сегментов готовых профилей

Профиль № 1			Профиль № 2		
Сегмент	Точка	Толщина, мм	Сегмент	Точка	Толщина, мм
I	4	1,52	I	5	1,04
II	3	1,53		6	1,03
III	1	1,49		7	1,02
	2	1,44	II	8	1,05
IV	5	1,49	III	9	0,97
—	—	—	IV	1	1,00
—	—	—		2	1,08
—	—	—		3	0,98
—	—	—		4	0,95

Верх черного участка столбчатой диаграммы (рис. 3.6) показывает суммарную величину изменения толщины. Из этого же рис. 3.6 можно понять, на каких переходах происходит утяжка (утонение), а на каких – подсадка заготовки (утолщение). Эти результаты хорошо согласуются со схемами формообразования (рис. 3.1а,б), откуда хорошо видно, что левая часть профиля формируется по открытой схеме, а правая – по закрытой, а сле-

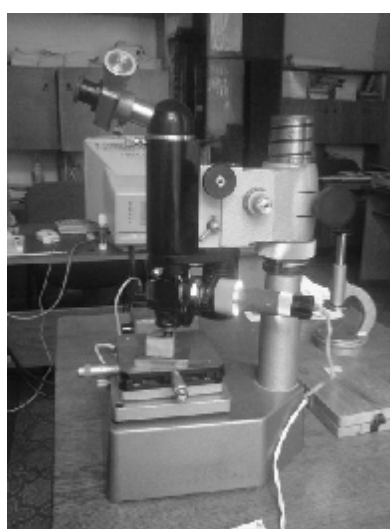


Рис. 3.4. Прибор ПМТ-3М для замера толщины стенок профиля и твердости

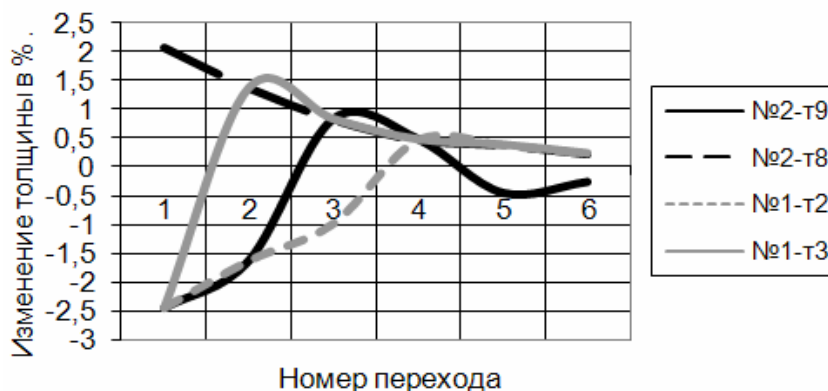


Рис. 3.5. Расчетные значения изменения толщины по переходам

довательно, сопровождается подсадкой заготовки. Значения изменения толщины на рис. 3.6 хорошо совпадают с данными, полученными опытным путем. Так, для точек 8 и 9 (профиль № 2) экспериментальные значения изменения толщины составляют +5 % и –3 % (см. табл. 3.7), а расчетные – +5,31 % и –5,52 % соответственно; для точек 2 и 3 (профиль № 1) экспериментальные значения составляют –4 % и +2% (см. табл. 3.7), а расчетные – –3,98 % и +0,81 % соответственно. Следовательно, для элементов, формуемых по полузакрытой схеме, расчетные (теоретические) значения изменения толщины отличаются от экспериментальных данных не более чем на 6 %.

Что касается влияния элементов жесткости, то зона изгиба (точка 4) профиля № 1 получила утолщение в 1,3% за счет подсадки при формовке полки до горизонтального положения при контакте ее торца с ограничивающей боковой поверхностью верхнего ролика. Сегмент I профиля № 2, формуемый по полузакрытой схеме, на всех переходах (кроме первого) находился в условиях сжатия, о чем свидетельствует утолщение в точках 5, 6, 7 (сегмент I), в то время как сегмент IV формовался в условиях перетяжки по открытой схеме, что подтверждается утонением материала в точках 3 и 4. Утолщение в точке 2 обусловлено, по-видимому, подсадкой при оформлении зоны изгиба на втором переходе, учитывая, что ее радиус составляет одну треть от толщины заготовки.

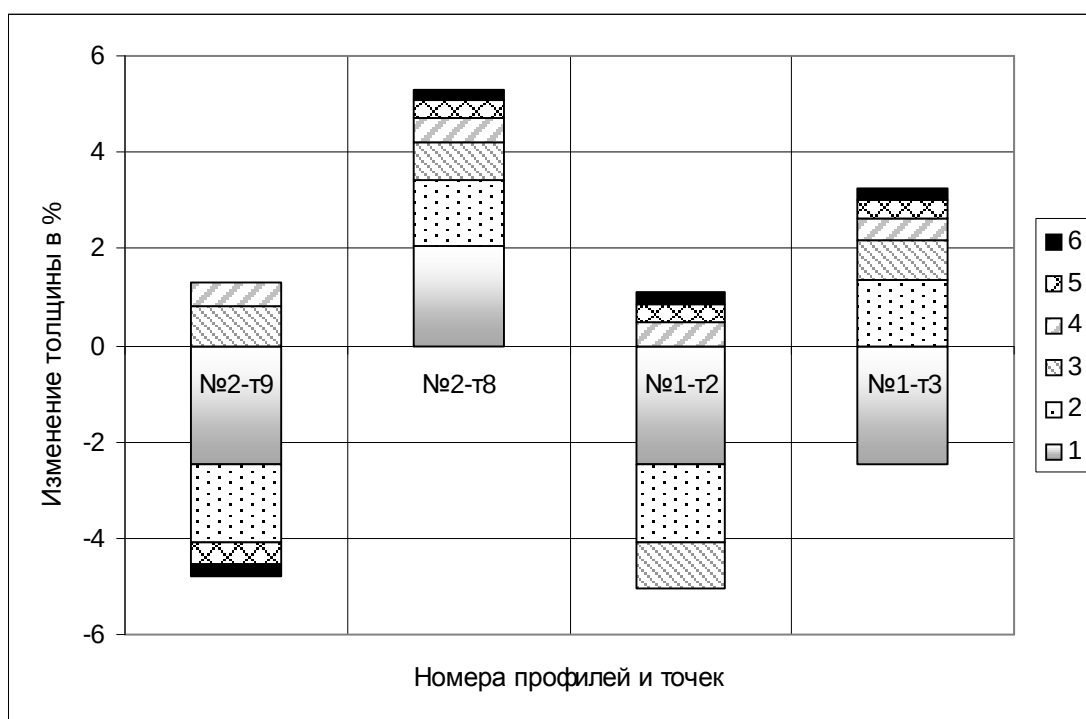


Рис. 3.6. Столбчатая диаграмма суммарного изменения толщины зон изгиба: номера в условном обозначении соответствуют номерам переходов

Изменение толщины заготовки в зоне изгиба [144] также изучали по профилям рис. 3.7 (профиль «а» ($85 \times 55 \times 0,85$ мм) содержит периферийные элементы двойной толщины (ЭДТ), профиль «б» ($37 \times 36 \times 1,5$ мм) имеет ЭДТ по вертикальной стенке и фальцевое соединение).

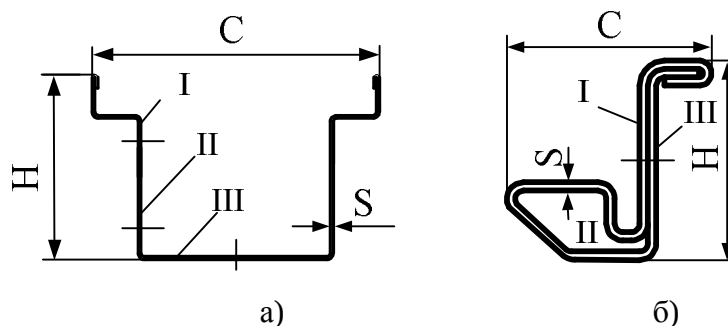


Рис. 3.7. Профиль с ЭДТ (а) и замкнутый профиль (б), формируемые по полузакрытой схеме

Эти профили характеризуются схемами формообразования, приводящими к изменению толщины заготовки практически во всех зонах изгиба. Анализ схемы формообразования и утонения очень важен для технолога при расчете ширины заготовки согласно формуле (2.1) и назначении параметров роликового калибра [145].

Схема разрезки профилей на сегменты представлена на том же рис. 3.7, а на рис. 3.8 показаны точки, в которых проводили замеры толщины заготовки.

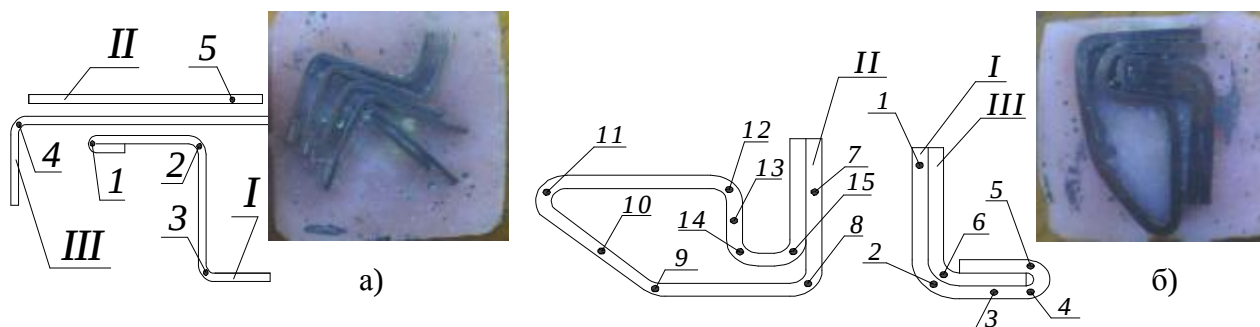


Рис. 3.8. Точки замеров толщины заготовки на профилях и микрошлифы

Результаты измерений толщины стенок профиля $85 \times 55 \times 0,85$ мм приведены в табл. 3.8. Исходная заготовка имела минусовой допуск порядка 0,02 мм, поэтому для боковой стенки (точка №5) получено значение 0,82 мм.

Для данного профиля характерно утонение практически для всех точек; наибольшее утонение наблюдается в точке №1 (при угле подгибки 180°). Как видно из схемы формообразования профиля (рис. 3.9), формовка угловых зон сопровождалась в той или иной мере перетяжкой заготовки, при этом ЭДТ получал конечную конфигурацию на первых пяти переходах.

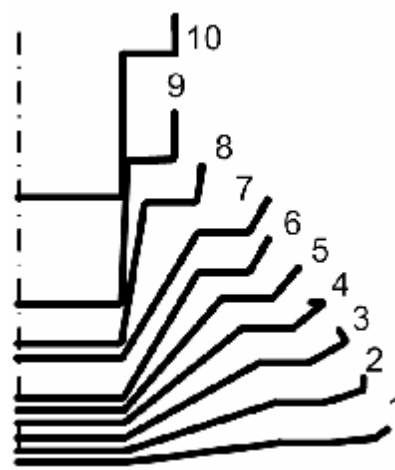
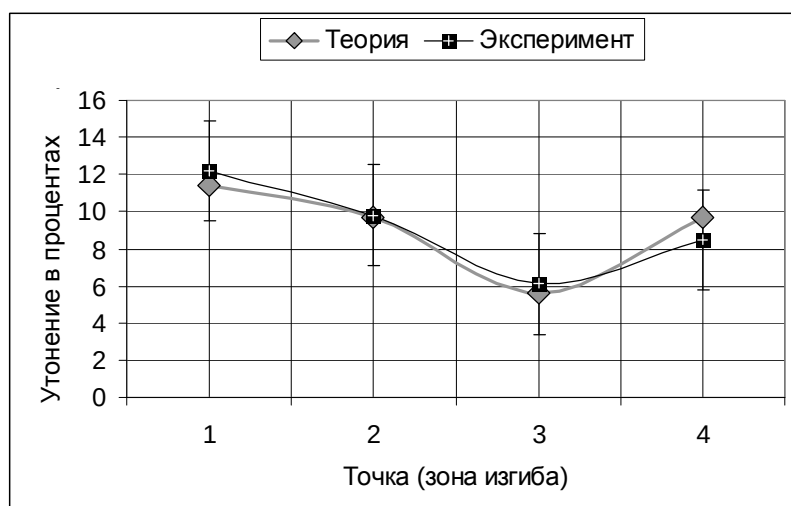
Таблица 3.8

Изменение толщины стенок профиля

Параметры и их размерность	Номера точек замеров на шлифе				
	1	2	3	4	5
Значение толщины, мм	0,72	0,74	0,77	0,75	0,82
Утонение стенки, %	12,2	9,8	6,1	8,5	1,2
*Абсолютная ошибка, %	2,7	2,4	1,4	1,9	1,2
* – по результатам пятикратного измерения					

При этом зона изгиба ЭДТ формируется с растяжением на первых двух переходах и с подсадкой на трех последующих. В первом случае приращение угла подгибки составляет около 40° , а во втором – несколько более 30° . Суммарный угол подгибки – 180° .

Зона изгиба 2 (точка 2 рис. 3.8,а) на первых двух переходах испытывает растяжение, а на трех следующих – подсадку в связи с формовкой периферийного ЭДТ. С шестого по десятый переход формовка сопровождается растяжением без перетяжки. Для точки 3 на первых двух переходах имеет место растяжение с перетяжкой через два скругления ролика, а на последующих переходах формовка осуществляется с незначительной подсадкой.

Рис. 3.9. Схема формообразования профиля $85 \times 55 \times 0,85$ ммРис. 3.10. Сравнение расчетных и экспериментальных значений изменения толщины угловых зон профиля $85 \times 55 \times 0,85$ мм

формовка осуществляется с незначительной подсадкой.

Для точки 4 первые два перехода сопровождаются растяжением с перетяжкой через два скругления роликов; на переходах 3 – 5 происходит подсадка, а с шестого по десятый переход – растяжение.

Для каждой из точек 1 – 4 (рис. 3.8,а) проведены расчеты в среде Math-Cad2001Pro алгебраическим суммированием изменений толщины (формулы (2.30) и (2.31)) по переходам, аналогично тому, как это представлено на рис. 3.6. Результаты расчетов и экспериментальные данные из табл. 3.8 представлены совместно на рис. 3.10, откуда видно, что расхождение теории и эксперимента не превышает 1,4 % в абсолютных значениях, что лежит в пределах максимальной экспериментальной погрешности, показанной вертикальными маркерами (см. табл. 3.8).

Еще более показательным в отношении изменения толщины является профиль 37×36×1,5 мм. Результаты измерений толщины заготовки в точках, показанных на рис. 3.8,б, приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Изменение толщины участков профиля 37×36×1,5 мм по точкам

Точки измерения	Значения толщины, мм	Точки измерения	Значения толщины, мм	Точки измерения	Значения толщины, мм
1	1,45	7	1,65	13	1,17
2	1,55	8	1,45	14	1,45
3	1,45	9	1,57	15	1,27
4	1,51	10	1,53	16	1,33
5	1,61	11	1,45	17	1,25
6	1,45	12	1,48		

Как и в первом случае, толщина исходной заготовки была в минусовом допуске и составляла 1,45 мм, а не 1,5 мм, что также подтверждают значения толщины заготовки на прямолинейных участках (см. значения для точек 1, 3 – выделено полужирным курсивом в табл. 3.9). Не вдаваясь в подробный анализ схемы формообразования (конфигурация профиля не является типичной для данного исследования), отметим лишь, что максимальное утонение получил участок заготовки с точкой 13, формовка которого происходила на первых переходах, а максимальное утолщение получил участок с точкой 7, формовка которого происходила на последних переходах (с осадкой прямолинейного вертикального участка заготовки со стороны верхнего ролика).

Учитывая приведенные результаты исследований утонения заготовки в зонах изгиба в схемах формообразования с преимущественным растяжением, для практических нужд можно использовать величину приращения заготовки [145] ΔB_i не в виде (2.32), а в более простой форме:

$$\Delta B_i = s_0 \cdot (\sqrt{r^2 + r + 0,5} + 0,5) \cdot a \cdot (0,25 - 0,10 \cdot r), \quad (3.1)$$

где r – относительный радиусгиба; α – угол между смежными элементами по чертежу профиля. Здесь знак «–» условно опущен.

На основании формулы (3.1) с помощью MathCad построены графические зависимости (рис. 3.11) для облегчения труда технологов.

Таким образом, экспериментальные исследования изменения толщины заготовки при МИД подтверждают с точностью до (11...21)% теоретические модели и расчетную формулу ширины заготовки. Уточненное определение ширины заготовки позволяет избежать ошибок при разработке технологического оснащения, сократить сроки и затраты на освоение технологии, повысить качество профилей.

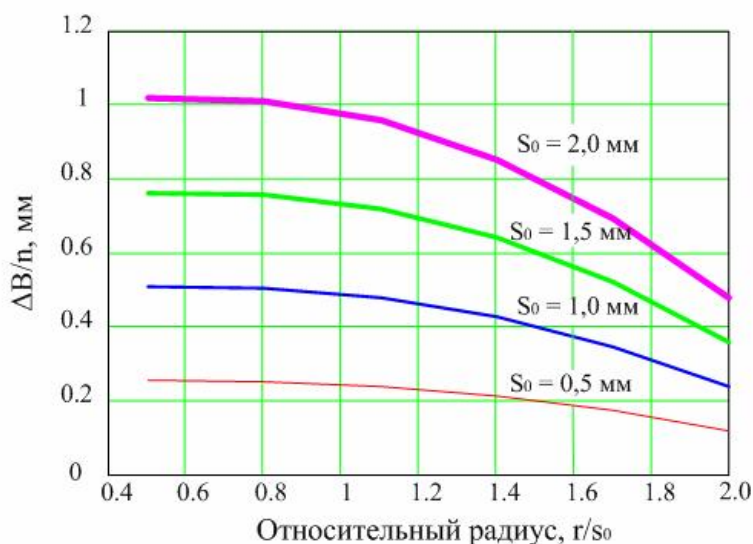


Рис. 3.11. Изменение ширины заготовки в расчете на один угол ($\alpha = 90^\circ$) для схем с преимущественным растяжением

3.2.2. Упрочнение при формообразовании полужакрытых профилей

Для подтверждения влияния упрочнения согласно формулам (2.44) и (2.45) предыдущего раздела [134] на НДС угловой зоны, проводили измерение микротвердости четырех профилей (рис. 3.3 и 3.8) в точках, указанных на этих рисунках. С каждой точкой рисунков соотносили три дополнительных точки (вблизи наружного контура, в центре и вблизи внутреннего контура зоны изгиба по биссектрисе угла; на прямолинейных участках такие же три точки располагались на одинаковом расстоянии друг от друга и от границ заготовки).

Испытание проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76 и работы [146] на приборе ПМТ-3 (рис. 3.4) путем вдавливания алмазного наконечника, имеющего форму пирамиды, в исследуемый образец, залитый в шиф. После снятия нагрузки на поверхности образца остается отпечаток в

виде пирамиды с квадратным основанием и диагональю d , которая вместе со значением нагрузки P используется при определении микротвердости по известной формуле [146] или по таблицам в приложении к ГОСТ 9450-76 (использовано нами). Замеры проводили пятикратно на каждую из дополнительных точек, после чего проводили статистическую обработку результатов с использованием пакета MS Excel. Результаты представлены в табл. 3.10 – 3.11 и на рис. 3.12 – 3.14.

Таблица 3.10

Значения микротвердости для профиля 35×27×1,5

№ точки	S-zone	SqDev5	N-zone	SqDev5	C-zone	SqDev5	MV	SqDev3
1*	206,5	5,5	200,5	5,9	214	6,3	207	6,8
2	285	7,2	258	6,7	296	9,2	279,7	19,6
3	258	6,1	219	7,3	276	7,4	251	29,1
4	249	5,7	241	4,8	266	8,1	252	12,8
5*	219	8,2	213	5,6	219	6,4	217	3,5

* – прямолинейный участок (зоны сжатия и растяжения не различаются)

Обозначения: S-zone – зона растяжения; N-zone – нейтральный слой; C-zone – зона сжатия; MV – среднее значение; SqDev – среднеквадратичное отклонение (цифра – число измерений)

Для наглядности, данные табл. 3.10 показаны на рис. 3.12, где хорошо видно, что в точках 1 и 5, расположенных на прямолинейном участке, микротвердость существенно ниже, чем в точках 2 – 4, относящихся к зонам изгиба. Фактически, в точках 1 и 5 микротвердость соответствует той же характеристике по значению, что и в исходной заготовке. В угловых зонах микротвердость вблизи внутреннего контура выше, чем тот же показатель вблизи наружного контура зоны изгиба, что согласуется с рис. 2.11, показывающим влияние упрочнения. При этом микротвердость в средней дополнительной точ-

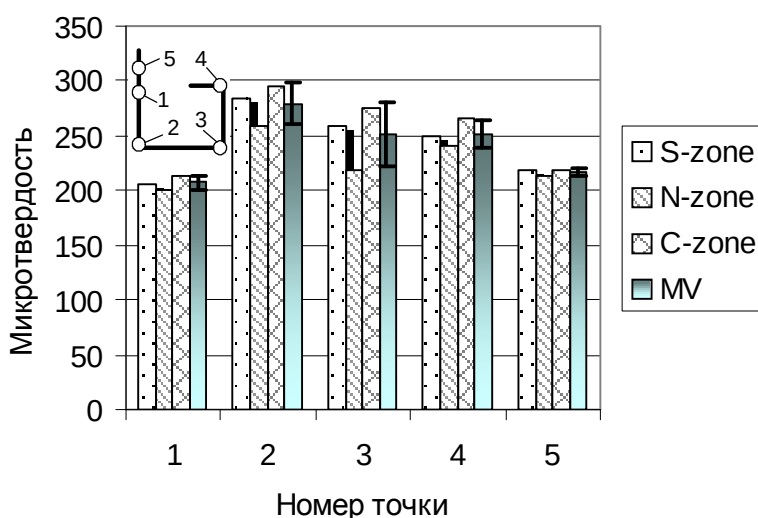


Рис. 3.12. Распределение микротвердости по точкам профиля 35x27x1,5 мм

ке (нейтральный слой) ниже, чем, в точках, расположенных ближе к периферии. Такая же картина наблюдается и на прямолинейных участках, однако она менее выражена. По-видимому, это можно отнести на счет небольшого упрочнения поверхностных слоев заготовки при профилировании (подгибка и скручивание полки или обжим). В целом, если теоретические результаты показывают увеличение интенсивности напряжений в угловой зоне на 10 – 15% из-за наличия упрочнения (см. рис. 2.11), то увеличение микротвердости, как это следует из рис. 3.12, составляет от 12 до 22 %, что свидетельствует о приемлемом уровне соответствия теории и эксперимента [147].

Аналогичные исследования проведены на образцах несимметричного профиля 42×28,5×1 мм; результаты приведены в табл. 3.11 и на рис. 3.13.

Таблица 3.11

Значения микротвердости для профиля 42×28,5×1 мм

№ точки	S-zone	N-zone	C-zone	MV	SqDev
1	226	219	241	228,7	11,2
2	241	226	258	241,7	16,0
3	249	234	258	247,0	12,1
4	249	241	258	249,3	8,5
5	266	249	276	263,7	13,6
6	249	258	266	257,7	8,5
7	258	266	276	266,7	9,0
8	241	226	249	238,7	11,7
9	241	234	226	233,7	7,5

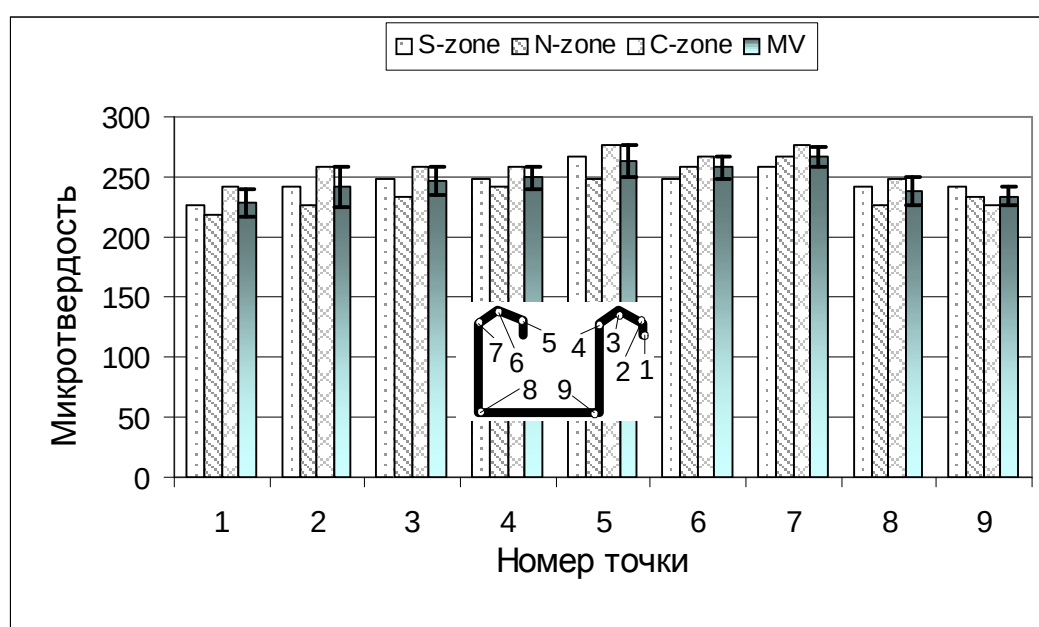


Рис. 3.13. Распределение микротвердости по точкам профиля 42x28,5x1 мм

Обозначения зон и параметров в табл. 3.11 аналогичны тем же характеристикам, что и в табл. 3.10. Анализ схемы формообразования (рис. 3.1,б) показывает, что полученное распределение микротвердости закономерно: участки, содержащие точки 2 – 4, формируются по открытой схеме, а участки с точками 5 – 7 формируются по полузакрытой схеме, откуда – некоторое отличие в значениях микротвердости. Этот показатель меньше для нижних угловых зон (точки 8 и 9) по сравнению с микротвердостью в других угловых зонах (точки 2 – 7) из-за

различия в схеме деформирования. В первом случае осуществлялась подгибка полок по схеме, приближенной к чистому изгибу моментом, в то время как во втором случае формовка происходила с боковой утяжкой, интенсифицирующей схему

формообразования. Впрочем, это отличие не превышает 12%, но оно выходит за пределы экспериментальной погрешности, которая, по крайней мере, в полтора – два раза меньше, чем это отличие. Значение микротвердости в точке 1 – наименьшее и, по-видимому, близко к этому же показателю в исходной заготовке. Однако так бывает далеко не всегда: например, при промежуточной осадке в схеме открытой формовки периферийный участок (кромка) может получать значительный наклеп.

Выполненные замеры микротвердости в характерных точках профиля 85x55x0,85 мм (рис. 3.7,а) приведены на рис. 3.14, откуда видно, что и в этом случае сохраняются ранее выявленные закономерности влияния упрочнения. Однако здесь различие в значениях микротвердости от точки к точке не превышает 17%, а максимальная погрешность укладывается в пределы 12%, что хорошо видно на рис. 3.14, где погрешности показаны маркерами на столбцах средних значений микротвердости. Что касается распределения микротвердости по зонам изгиба профиля 37×36×1,5 мм, то здесь разброс данных

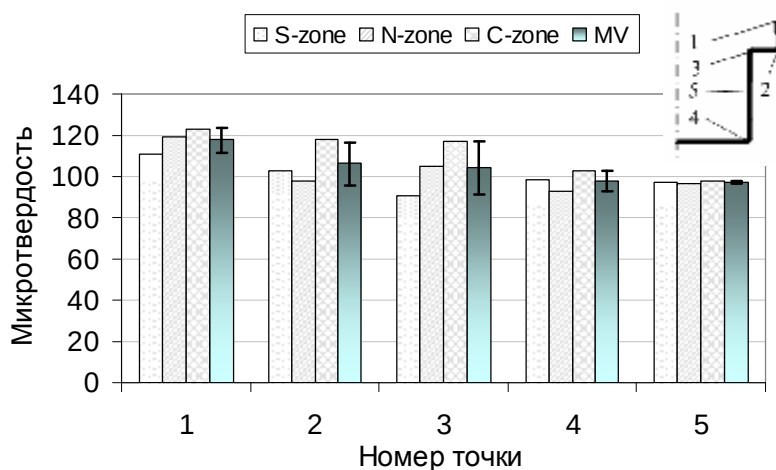


Рис. 3.14. Распределение значений микротвердости профиля 85x55x0,85 мм по точкам сечения

достигает 40 %, что связано со сложной схемой формообразования (в работе не анализируется по причине, указанной выше по тексту).

Проведенные исследования микротвердости в целом показывают увеличение данного показателя от 12 до 22% в угловых зонах при уровне увеличения интенсивности напряжений в них на 10 – 15% по данным теории. Это позволяет считать теоретическую модель пригодной для расчета технологических параметров процесса формообразования.

3.2.3. Влияние подсадки полки на характеристики НДС

Как показано в разд. 2, подсадка полки (рис. 2.3,б и 2.5) позволяет уменьшить пружинение угловой зоны или даже сделать его отрицательным [137], однако в этом случае существуют ограничения на уровень напряжений подсадки или величину подсадки. С одной стороны, это сопряжено с потерей устойчивости подсаживаемой полки (обычно при посадке наружного контура зоны изгиба на инструмент [147]), а с другой – с образованием микроскладок или нарушением покрытия по внутреннему контуру зоны изгиба [148]. Поэтому установление предельных значений и зависимостей технологических параметров от характеристик НДС угловой зоны является важным для технологии МИД.

Измерение напряжений и деформаций в угловой зоне, например, тензометрированием затруднено из-за малости ее размеров. Поэтому более целесообразно проверку разработанных моделей угловой зоны проводить на основе результатов, полученных методом конечных элементов¹. Использовали пакет Ansys 7.1 (модуль LS-dyna), приобретенный по лицензии Ульяновским государственным техническим университетом. Программу Solid Works использовали в качестве препроцессора, а обработку результатов производили встроенными средствами программы Ansys.

Проводили моделирование процесса подсадки полки профиля из материала ст 3сп толщиной 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм с приведением параметров угловой зоны к исходной толщине заготовки. Скорость нагружения соответствовала реальной скорости процесса формообразования. Процесс формообразования разбивался на ряд последовательных шагов, наиболее характерные из которых приведены на рис. 3.15. На рис. 3.16 – 3.18 значения величины подсадки по оси абсцисс соответствуют моделям (рис.

¹ В исследовании принимали участие инженеры Алексеевский Е.А. и Левщанов В.В.

3.15) в порядке их следования. При высвобождении угловой зоны калибра весьма трудно предсказать теоретически величину радиуса и утолщения заготовки, в то время как МКЭ является достаточно эффективным инструментом для такого рода исследований. Рис. 3.16 показывает монотонное изменение радиуса кривизны внутреннего контура зоны изгиба и почти линейную зависимость смещения НСН от величины подсадки. При этом выход НСН на наружный контур зоны изгиба наблюдается примерно на 88 шаге нагружения (см. рис. 3.15). Это означает, что вся зона изгиба находится в пластическом состоянии, радиус кривизны внутреннего контура стабилизируется и фактически исчерпывается ресурс пластичности материала вблизи него. Дальнейшая подсадка приводит к потере устойчивости полки в форме изгиба с последующим утолщением

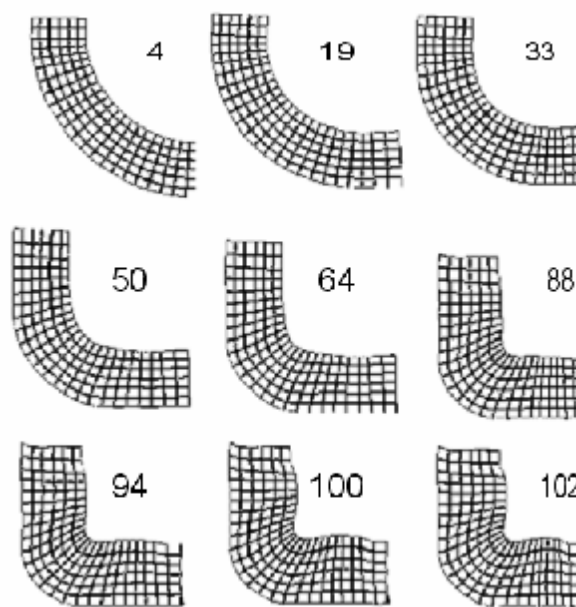


Рис. 3.15. Модели угловой зоны на различных этапах нагружения

(см. шаги 94 – 102 на рис. 3.15). Изменение утолщения показывает, что оно может превышать 30%, однако при формообразовании полузакрытых профилей достичь требуемой силы подсадки не удастся, а кроме того, при относительном радиусе кривизны менее 0,9 на внутреннем контуре зоны изгиба появляются микроскладки и нарушение покрытия [4]. Исследование МКЭ напряжений подсадки в полке показывает, что при величине подсадки 0,7 мм среднее напряжение торцового поджатия составляет не более $0,5\sigma_s$, что достаточно хорошо согласуется с результатами раздела 2.2. На рис.

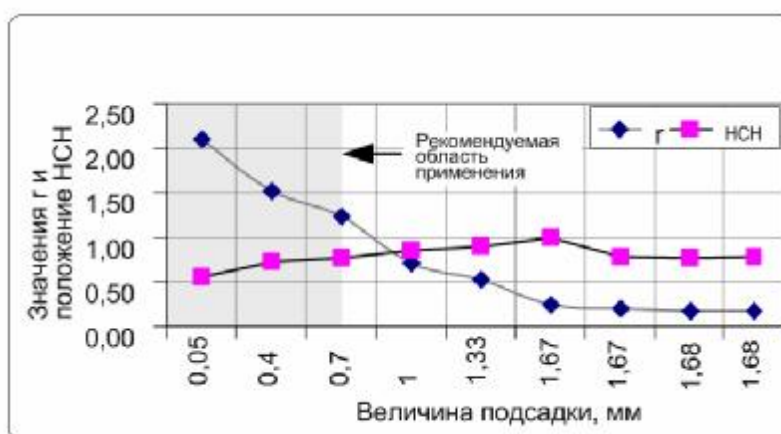


Рис. 3.16. Зависимость внутреннего радиуса и положения НСН от величины подсадки

3.15 видно, что наружный слой элементов на всем протяжении процесса практически не меняет своей толщины (образуется застойная зона), а внутренний слой подвержен существенному изменению толщины. Механизм этого явления реализуется через деформации сдвига [107] при наличии касательных напряжений, распределение которых показано на рис. 2.13. Анализ деформаций показывает, что окружные деформации (в рекомендуемой области, см. рис. 3.16) на наружном контуре не превышают (5 – 10) %, а на внутреннем контуре они лежат ниже границы в 25 %. Следовательно, наружный контур разгружается за счет действия торцевых сил, а внутренний нагружается дополнительно.

Для практики важным является выявление получаемой конфигурации зоны изгиба (радиуса изгиба и утолщения), а также пружинения при подсадке полки профиля. Такие зависимости приведены на рис. 3.16 – 3.18 с обозначением рекомендуемой области применения подсадки.

В частности, рис. 3.18 показывает, что при значительной подсадке пружинение может быть сведено к нулю или даже становится отрицательным (в основном, за счет изгиба прилегающей полки).

Однако графические соотношения сложно использовать в автоматизированных расчетах, поэтому предлагаются аналитические соотношения, полученные аппроксимацией вышеуказанных графических зависимостей в среде MS EXCEL:

- относительный радиус гiba – $r(\Delta h) = 2,978 \cdot \exp(-0,356 \cdot \Delta h)$, (3.2)

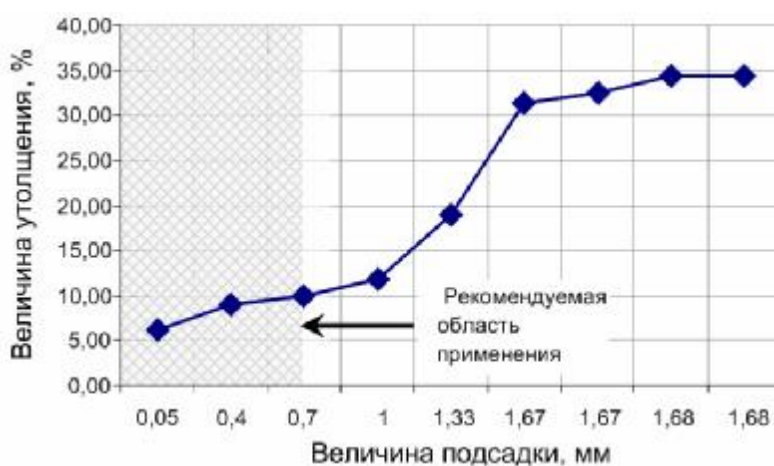


Рис. 3.17. Зависимость величины утолщения угловой зоны от величины подсадки полки

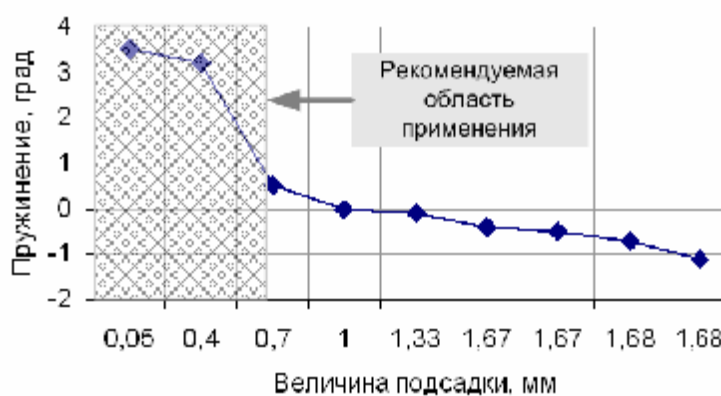


Рис. 3.18. Зависимость пружинения от величины подсадки полки

- утолщение (в процентах) – $\Delta S(\Delta h) = 5,38 \cdot \exp(0,236 \cdot \Delta h)$, (3.3)

- пружинение (в градусах) – $\Delta a(\Delta h) = 0,1012 \cdot (\Delta h)^2 - 1,5536 \cdot \Delta h + 5,0524$, (3.4)

где Δh – величина подсадки в мм.

Подсадка полки при МИД существенно отличается от осадки волнообразной заготовки при СИ. В первом случае схема НДС в угловой зоне близка к схеме плоской деформации. Расчет фактора Лоде в решенных задачах для четырех толщин заготовок показывает, что его значение близко к нулю, а продольная деформация в любой точке заготовки на биссектрисе угла не превышает 0,4 % при выполнении условия несжимаемости. При СИ, в результате осадки заготовки, продольная деформация может достигать (8 – 10) % [24, 149].

При изготовлении МИД некоторых видов полузакрытых профилей с подсадкой полки набор толщины может не наблюдаться в случаях: 1) когда внутренний радиус зоны изгиба задается инструментом по его номинальному значению без зон высвобождения, 2) когда при наличии зон высвобождения ширину заготовки выбирают такой, чтобы утолщения полок или потери устойчивости не происходило. Подсадка заготовки – не единственный путь уменьшения допустимого радиуса и уменьшения пружинения. В работе [150] показано, что при радиальном сжатии в штампе минимальный радиус изгиба уменьшается в 1,6...2,0 раза и уменьшается пружинение примерно на 20%. При этом утонение заготовки может достигать 10%. В роликах данная схема фактически не реализуется из-за нарушения покрытия при скользящем контактом давлении.

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.

3.3. Влияние наличия рифтов и гофр на процесс формообразования

3.3.1. Множественные рифты/гофры

Как было показано в разд. 2.3, формовка рифтов в донной части полузакрытого профиля сопровождается утонением заготовки, что связано с боковой утяжкой материала при параллельной схеме формовки [139]. Ограничения на величину утонения позволяют определить число переходов или же число одновременно формируемых гофр в одном переходе. Для подтверждения теоретических моделей (2.74) – (2.76) производили формообразование гофр высотой 20 мм с шириной стенки 24,4 мм и шагом 50 мм из сплава Д16 толщиной 1,2 мм по параллельной схеме формовки. Распределение утонения по ширине сечения

производили с помощью прибора МПБ-2 с точностью до 0,05 мм. Совмещенные результаты расчета и экспериментальные данные приведены на рис. 3.19, откуда видно, что при условии $\delta \leq 10\%$ для указанных выше размеров гофр число их на заготовке не должно превышать двенадцати. На том же рис.

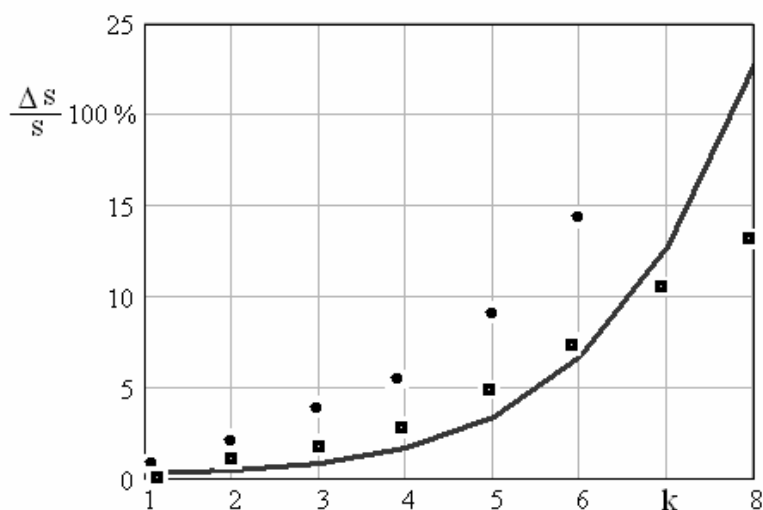


Рис. 3.19. распределение утонения по ширине дна: круговые маркеры – согласно работе [151]; квадратные маркеры – данные автора

3.19 приведены экспериментальные значения для прямоугольных гофр тех же размеров согласно работе [151] (отмечены круговыми маркерами) и экспериментальные значения для трапецевидных гофр с углом $\alpha = 18^\circ$ (отмечены квадратными маркерами). Сплошная линия на рис. 3.19 соответствует теоретической модели разд. 2.3 для трапецевидных гофр указанных размеров и дает представление об уровне соответствия данных модели результатам экспериментальных замеров. За исключением срединной точки (гофр 8 на рис. 3.19), уровень рассогласования теории и эксперимента не превышает 15 %. Отличие экспериментальных данных работы [151] и авторов объясняется различием в схеме формовки: в первом случае формовка осуществлялась по параллельным прямым, а во втором случае – по сходящимся прямым.

Если множественные рифты/гофры формируются предварительно на первых переходах, то формовка одиночных рифтов происходит, как правило, по совмещенной схеме, одновременно с формовкой периферийных элементов и с подгибкой несущей полки.

3.3.2. Одиночные рифты [152, 153]

Задача состояла в выявлении преемственности режимов формовки профилей с рифтом в донной части по отношению к режимам формовки профилей с гладким дном, а также особенностей формовки одиночных рифтов. Режимы формовки швеллерных профилей (рис. 3.20,а) с использованием МИД прошли достаточное опытное апробирование [19], которое показало влияние ширины донной части профиля: режимы формовки широких профилей непригодны для изготовления профилей с узким дном. Для полузакрытых профилей наличие рифта в донной части приближает их к профилям с абсолютно жестким дном – узким профилям (рис. 3.20б, в).

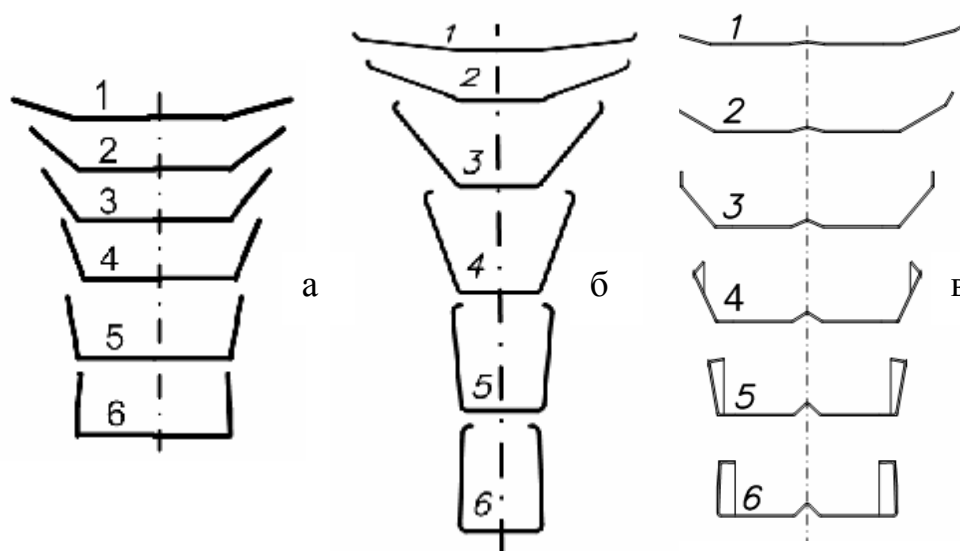


Рис. 3.20. Схемы формообразования профилей: а – швеллерного; б – С-образного с узким гладким дном; в – С-образного с одиночным треугольным рифтом в донной части

Изучали формообразование С-образного профиля 145x45x13x1 мм с гладким дном и одиночным треугольным рифтом размером 20x10 мм [153] в донной части профиля по следующей программе: а) изготовление профиля с гладким дном с уменьшением его ширины до появления дефектов; б) совмещение формовки отбортовок и подгибки полок с полной формовкой рифта на первых двух переходах; в) совмещение формовки отбортовок и подгибки полок с постепенной формовкой рифта по переходам. Радиусы сопряжения ме-

жду элементами профиля составляли 2 мм. Использовали сборную оснастку, позволяющую изменять ширину донной части профиля.

Схема «а». При формообразовании профиля с гладким дном шириной 145, 130 и 110 мм дефекты кромок отсутствовали. При ширине дна менее 90 мм возникал излом кромок.

Схема «б». Формовка рифта за два перехода сопровождалась изломом кромок в четвертом и последующих переходах. По сторонам рифта имели место отклонения примыкающих к рифту участков от -5° на первом переходе до $+3,5^\circ$ на втором с последующим уменьшением до нуля в последнем переходе. На рис. 3.21 приведены зависимости изменения ширины профиля и

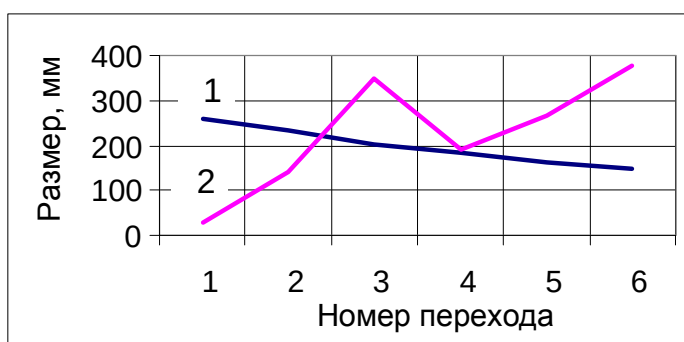


Рис. 3.21. Ширина профиля (1) и протяженность ЗПП (2) по переходам

протяженности ЗПП по переходам, откуда видно, что началу изломов полок соответствует скачок протяженности ЗПП. Излом полки уменьшает ЗПП. При этом данная характеристика не превышает межклетьевого расстояния профилировочного станка (400 мм) для любого из

переходов. Расстояния между изломами (шаг излома) сохраняются одинаковыми для левой и правой полок (рис. 3.22). Абсолютные значения шага излома отличаются существенно только в начале и конце изготовленного образца профиля, что обусловлено концевыми эффектами (изменение условий формообразования).

Схема «в». Равномерная формовка рифта по переходам со стеснением 1,5 мм за переход с монотонным изменением ширины и высоты рифта с 29 до 20 мм и с 2 до 10 мм соответственно приводила к «развалу» (боковому выпучиванию) профиля в межклетьевом пространстве (на 4 – 6 переходах – порядка 7 – 10 мм на сто-

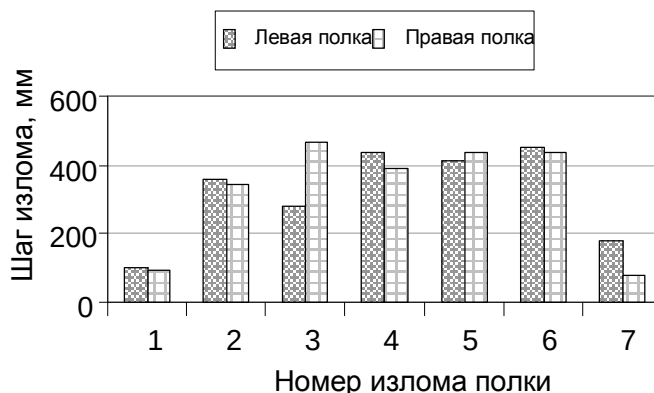


Рис. 3.22. Характеристика изломов полок

рону), однако, излом полок отсутствовал. Характеристики профиля соответствовали требованиям технических условий на его поставку.

Отсюда следует, что повышение жесткости дна профиля на первых переходах делает невозможным применение схем формообразования профиля с гладкой донной частью тех же габаритных размеров сечения (т.е. отсутствует преемственность), однако постепенная формовка рифта по переходам хотя и приводит к начальной стадии пластической неустойчивости, однако может не приводить к неисправимому браку, каковым является излом полки. Однако существует и более кардинальный способ влияния на режимы изготовления профиля для сохранения преемственности схемы формообразования.

Изучали формообразование С-образного профиля 195x45x13x0,7 мм с рифтом 20x10 мм в донной части и радиусами сопряжения элементов по внутреннему контуру зоны изгиба 1,5 мм по следующей программе: а – с равномерной формовкой рифта по переходам; б – с увеличением базовых диаметров роликов на 1 % от перехода к переходу (натяг кромки).

Схема «а». При равномерной формовке рифта по переходам имел место «развал» профиля на 12-20 мм на 4 – 6 переходах с изломом его полок. Процесс сопровождался неравномерным изменением ЗПП от 60 до 340 мм с колебаниями до 100 мм.

Схема «б». При изготовлении того же профиля с увеличением базовых диаметров роликов на 1 % от перехода к переходу наблюдался натяг кромки с уменьшением «развала» профиля. В этом случае излом полок отсутствовал, а протяженность ЗПП изменялась по переходам следующим образом: 65 – 210 – 380 – 400 – 400 – 400 мм. Параметры готового профиля соответствовали техническим условиям на его поставку.

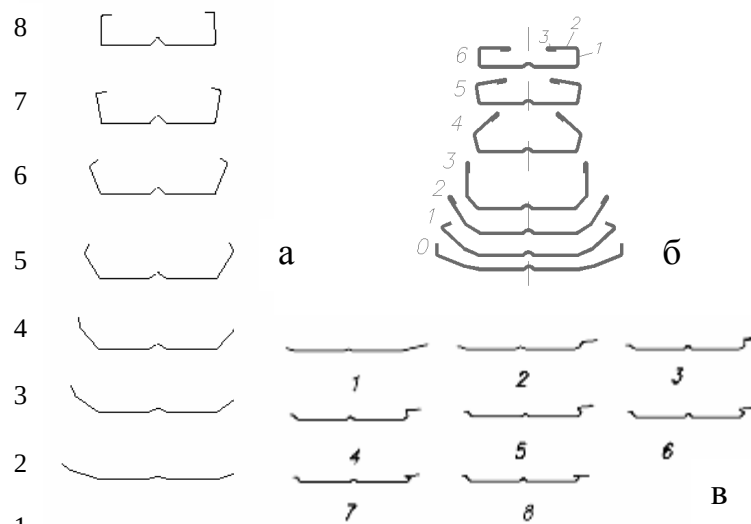


Рис. 3.23. Схемы формообразования профилей различных размеров, имеющих рифты

Аналогичные закономерности наблюдались при изготовлении других С-образных профилей с рифтами (рис. 3.23) [152].

Отсюда следует, что равномерная формовка рифта по переходам и натяг кромки в ряде случаев могут использоваться для сохранения преимущественности технологии изготовления полузакрытых профилей с гладким дном с целью уменьшения затрат на проектирование и отработку технологии.

3.3.3. Комбинированные глубокие рифты

Формовка глубоких комбинированных рифтов обычно сопровождается значительной боковой утяжкой и утонением заготовки [152]. При ограничении на толщину конечного профиля возникает необходимость увеличения переходов с формовкой первоначально рифтов по «мягким» схемам с последующей подгибкой боковых элементов, или же приходится вырабатывать специальные схемы формовки в рамках МИД с целью сокращения переходов



Рис. 3.24. Профиль для складского хозяйства

(до 30%). Профиль для складского хозяйства 110x77x2 мм из оцинкованной стали (ГОСТ 14918-80) (рис. 3.24) имеет по ТУ ограничение на утонение – 0,1 мм. В сечении профиля имеются три основных элемента, влияющих на процесс формообразования: рифты 30S-7S и 16S-2S; полукруглая отбортовка R3. Разработка технологии велась по вариантам, приведенным в табл. 3.12².

Апробирование схем 1 и 2 показало, что отбортовка, формируемая одновременно с рифтом, увеличивает жесткость полки и приводит к утонению заготовки: в первой схеме оно достигало значения 0,9 мм, а во второй – 0,5 мм. Поэтому в схемах 3 и 4 формовка отбортовки шла за формовкой рифта.

Таблица 3.12

Последовательность формовки профиля

Последовательность формовки			Номер схемы формообразования
1	2	3	
Рифт 30S-7S- рифт 16S-2S- отбортовка	–	–	1 и 2 (параллельная формовка)
Рифт 30S-7S	Рифт 16S-2S	Отбортовка	3
Рифт 30S-7S- рифт 16S-2S	Отбортовка	–	4

² Отработку технологии и корректировку схем формообразования выполнил к.т.н. Илюшкин М.В.(УлНИАТ)

Первые три схемы формообразования представлены на рис. 3.25, откуда видно, что вторая схема представляет собой более «мягкую» схему формовки, чем первая. В третьей схеме формообразования первоначально формируется дугообразная заготовка, затем – рифт 30S-7S, а на последних двух переходах формируется рифт 16S-2S обжимом участка заготовки с поперечной кривизной (рис. 3.25, «3»). Вертикальное расположение стенок рифта обеспечивает меньшее утонение в зонах изгиба. С помощью прибора МБП-2 измеряли утонение в зонах изгиба на каждом переходе. Утонение в наиболее характерных точках (верхние угловые точки) для этих схем представлено на рис. 3.26.

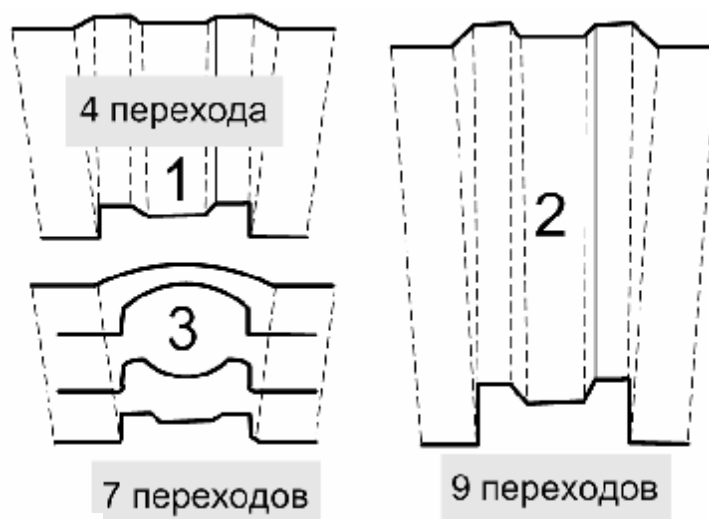


Рис. 3.25. Первые три схемы формообразования комбинированного рифта

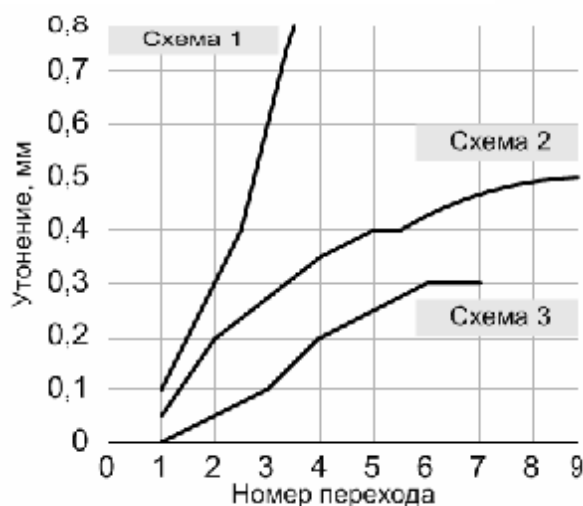


Рис. 3.26. Утонение в вершинных точках рифта в различных технологических схемах

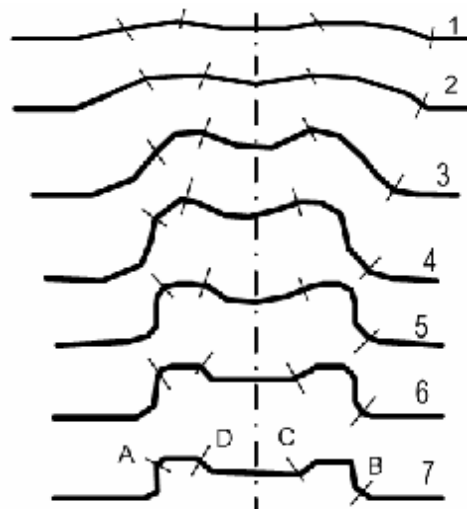


Рис. 3.27. Схема формообразования комбинированного рифта

Так как третья схема формообразования дала наименьшее утонение, то на ее основе была разработана четвертая схема с различными характеристиками сечений по переходам.

В четвертой схеме формовку обоих рифтов производили по «мягкой» схеме и изучали влияние радиусов скругления инструмента на утонение заготовки на первых четырех переходах по следующим режимам: 7-5-3-2 мм; 30-20-6-4 мм; 30-20-10-6 мм; 25-20-10-6 мм. Соответствующие этим режимам

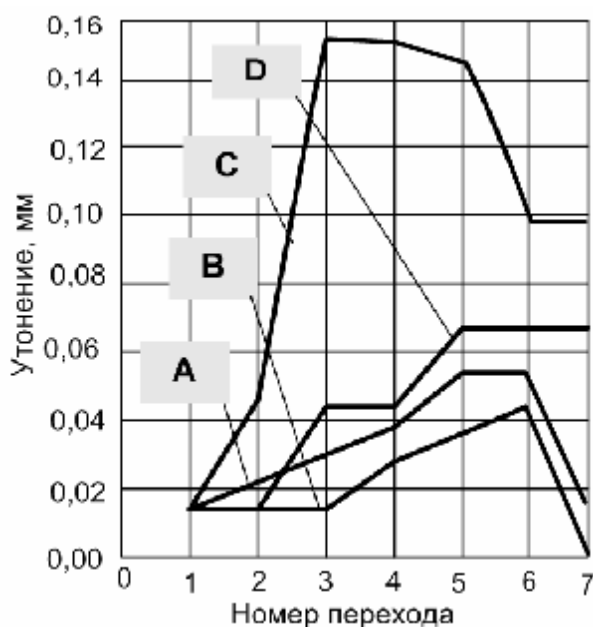


Рис. 3.28. Утонение зон изгиба комбинированного рифта

величины утонения: 0,27; 0,19; 0,13 и 0,10 мм. Было выявлено, что малые радиусы инструмента препятствуют перетяжке материала, что вызывает утонение заготовки. На рис. 3.27 представлена четвертая схема формообразования, а на рис. 3.28 – распределение утонения по переходам в характерных точках А – D, указанных на рис. 3.27.

Формовка рифтов в донной части профиля по четвертой схеме не испытывает влияния полукруглой от-



Рис. 3.29. Элементы профиля при формовке: а – дугообразный рифт; б – двугорбый рифт; в – полукруглая отбортовка

бортовки с радиусом R3, которая формируется на последующих трех переходах. В принципе, формовка данного элемента может осуществляться и за меньшее число переходов (один-два), однако размерные параметры отбортовки существенно ухудшаются. Отформованная отбортовка должна быть свободно пропущена через остальные переходы. В противном случае воз-

можно нарушение форм и размеров данного элемента. Например, подсадка полки приводит к искривлению отбортовки и самой несущей полки. Наличие участков высвобождения в роликовых калибрах позволяет получить отбортовку удовлетворительного качества при надлежащем выполнении условий замыкания роликовых калибров



Рис. 3.30. Налипание цинкового покрытия на формующие ролики (а, б) и перетирание вала из-за чрезмерной нагрузки, связанной с налипанием цинкового покрытия (в)

[154]. На рис. 3.29 показана заготовка в промежуточных стадиях формовки.

На выбор схемы формообразования профиля влияет наличие цинкового покрытия исходной заготовки. Следует применять достаточно «мягкие» схемы формовки, поскольку при жестких схемах в отсутствие смазки может происходить снятие покрытия и налипание материала на формующие ролики (рис. 3.30) в зонах, примыкающих к угловым зонам у основания вертикальных полок. Из-за налипания материала покрытия на формующие ролики происходит уменьшение зазора в калибре, что приводит к значительному увеличению энергетических параметров формовки, аксиальной вытяжке (раскатке) профиля или даже перетиранию и скручиванию рабочих валов профилировочного станка.

Таким образом, при жестких требованиях к утонению стенок профиля в зонах изгиба комбинированного рифта формообразование профиля следует производить в последовательности: формовка рифтов в донной части, формовка периферийных элементов жесткости, подгибка элементов до окончательной конфигурации. Для предотвращения утонения и нарушения покрытия следует использовать «мягкие» режимы формовки, в частности:

- § при формовке рифтов следует сочетать плавные формы заготовки на первых переходах с постепенной осадкой ее в последующих;
- § углы подгибки не должны превышать их предельных значений;
- § радиусы скругления инструмента должны превышать 2 – 3 мм, а радиусы скругления буртов – 3 – 5 мм;
- § для отформованных элементов жесткости следует предусматривать зоны высвобождения в калибрах последующих переходов;
- § применять смазочные жидкости (мыльный раствор, СОЖ) при профилировании.

В отсутствие жестких требований к утонению в зонах изгиба комбинированного рифта возможно изготовление того же профиля «стойка» по схеме

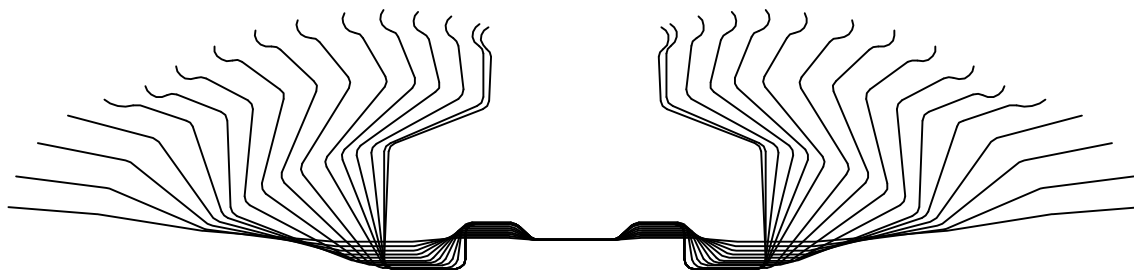


Рис. 3.31. Схема формообразования профиля «стойка» по технологии НПО «ИДМ» параллельной формовки («розеточная» схема формообразования профиля любезно предоставлена НПО «ИДМ») (рис. 3.31) [155].

На случай формовки разновысоких рифтов в донной части профиля один из подходов указан в работе [18]. Установленные закономерности при формообразовании рифтов не исчерпывают всего спектра задач, возникающих в процессе создания технологии изготовления полузакрытых профилей с использованием МИД, в частности, поведение заготовки в межклетьевом пространстве является предметом экспериментального исследования.

3.4. Исследование поведения заготовки в межклетьевом пространстве

В отсутствие потери устойчивости элементов профиля два эффекта подлежат исследованию: 1) протяженность ЗПП многоэлементной подгибаемой полки, зависящей как от ее конфигурации, толщины стенок профиля, так и от углов подгибки; 2) эффект прогиба донной части профиля и «ослабления» углов подгибки [52, 140, 156, 157].

3.4.1. Протяженность ЗПП и предельные углы подгибки

Разработанную модель протяженности ЗПП (2.105), полученную для гладкой полки, следует проверить на предмет использования при расчетах формообразования полузакрытых профилей с элементами жесткости. Как видно на рис. 2.21, она достаточно хорошо работает в случае формообразования профилей типовой номенклатуры [140]. В случае полузакрытых профилей необходимо прибегать к так называемому методу локальных жесткостей и приводить полку, несущую элементы жесткости, к эквивалентной гладкой полке. Предлагается следующая процедура для каждого из переходов: а) выделяется подгибаемая полка с «надстройкой» в виде элементов жесткости (отбортовка, ЭДТ и т.д.); б) рассчитывается полярный момент инерции относительно базовой (корневой) точки J_p и приравнивается к полярному моменту гладкой эквивалентной полки, откуда получаем эквивалентную толщину полки s :

$$s = \frac{3J_p}{b^3}. \quad (3.5)$$

где b – ширина несущей полки.

Исследования проводили при формообразовании полузакрытых профилей с жесткой донной частью согласно табл. 3.1 и рис. 3.32, на котором приведены схемы формообразования каждого из изучаемых профилей. На каждом переходе измеряли протяженность ЗПП по методике работы [19].

Расчетные значения ЗПП получали следующим образом. Из схемы формообразования для каждого перехода выделяли подгибаемые полки с «надстройкой» в среде «Компас-3D V9» и утилитой «МЦХ» получали значения полярного момента инерции сечения относительно корневой точки. Затем в пакете MathCAD производили расчет эквивалентной толщины полки по формуле (3.5), а затем – протяженность ЗПП по формуле (2.105) с предварительным определением углов подгибки соответствующих полок (несущей и периферийной) по переходам на основе схемы формообразования. Ниже для каждого из профилей приведены режимы подгибки, а также расчетные и экспериментальные значения протяженности ЗПП. В модели (2.105) принимали $C = 0$ (дно абсолютно жесткое).

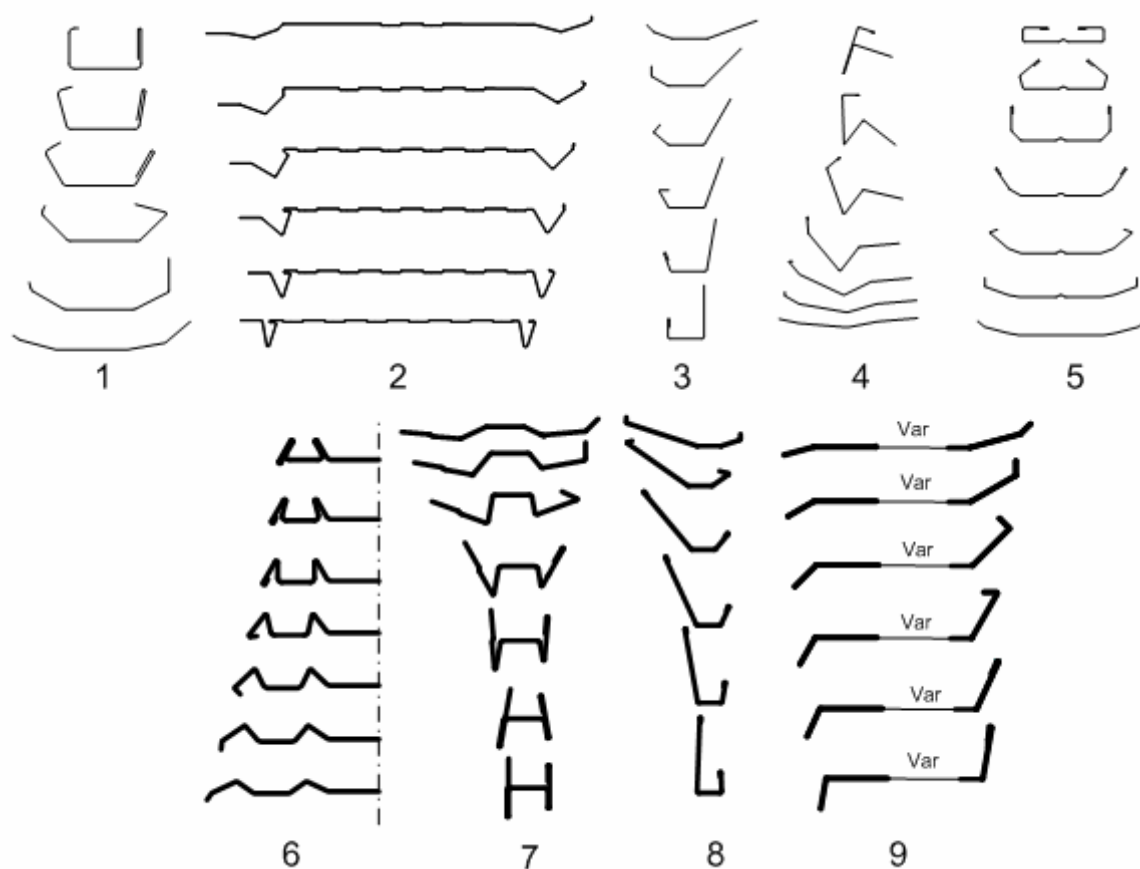


Рис. 3.32. Схемы формообразования полузакрытых профилей

Для профиля водосточной системы (рис. 3.32-9) углы подгибки элементов и результаты расчетов и замеров протяженности ЗПП приведены в табл. 3.13 и 3.14, откуда видно, что расхождение расчетных и экспериментальных данных для периферийных элементов не превышает 11%, а для полки «1п» – 18%.

Таблица 3.13

Суммарные углы подгибки элементов профиля по переходам

Конфигурация профиля	Переход	Углы подгибки элементов, град		
		1л	1п	2п
	1	195	15	45
	2	210	30	90
	3	225	45	135
	4	240	60	180
	5	245	65	240
	6	260	80	0

В табл. 3.15 и 3.16 представлены данные, полученные при изготовлении неравнополочного профиля с ЭДТ по схеме рис. 3.32-3. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных для полки с ЭДТ не превышает 26%, а для периферийного элемента – 17%.

Таблица 3.14

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметр		Номер перехода					
		1	2	3	4	5	6
Jр, мм ⁴ (левая полка)		2178	2200	2213	2214	2211	2189
Jр, мм ⁴ (правая полка)		22196	21613	20617	19597	18543	18499
Исходная толщина, мм		0,6					
Сэкв, мм (правая полка)		1,19	1,16	1,12	1,05	0,99	0,99
Протяженность ЗПП, мм (правая полка)	Расчет	263	268	275	287	124	301
	Эксперимент	223	231	229	242	113	268
Протяженность ЗПП, мм (левая полка)	Расчет	93,7	93,7	93,7	93,7	61,6	93,7
	Эксперимент	95	97	96	101	54	98
Протяженность ЗПП элемента (2п), мм	Расчет	59,3	59,3	59,3	59,3	67,2	0
	Эксперимент	64	63	66	60	72	0

В табл. 3.17 и 3.18 приведены результаты исследования формообразования профиля по схеме рис. 3.32-8. Расхождение данных теории и эксперимента лежит в пределах 20%, за исключением левой полки на последних трех переходах, где расхождение превышает 30%. По-видимому, рифты на полке существенно повышают жесткость, в то время как полярный момент инерции слабо изменяется из-за наличия мелких рифтов. Полка в этом случае становится достаточно жесткой, вследствие чего получены заниженные значения протяженности ЗПП.

В табл. 3.19 и 3.20 представлены данные, полученные при изготовлении С-образного профиля с периферийными ЭДТ по схеме рис. 3.32-5.

Таблица 3.15

Суммарные углы подгибки элементов профиля по переходам

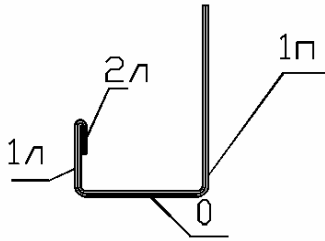
Конфигурация профиля	Переход	Углы подгибки элементов, град		
		1л	2л	1п
	1	-200	-225	20
	2	-210	-270	45
	3	-220	-310	60
	4	-240	-360	70
	5	-250	0	80
	6	-270	0	90

Таблица 3.16

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметр		Номер перехода					
		1	2	3	4	5	6
Jp, мм ⁴ (левая полка)		248	231	206	187	166	179
Jp, мм ⁴ (правая полка)		1498	1518	1537	1553	1573	1601
Исходная толщина, мм		0,6					
Сэкв, мм (левая полка)		1,45	1,35	1,2	1,1	1,07	1,05
Протяженность ЗПП, мм (левая полка)	Расчет	17,5	15,2	13,7	17,5	18,4	22,2
	Эксперимент	14	13	12	16	15	18
Протяженность ЗПП, мм (правая полка)	Расчет	122,3	131,1	87,4	87,4	87,4	87,4
	Эксперимент	114	109	78	82	80	78
Протяженность ЗПП элемента (2л), мм	Расчет	13,7	13,7	12,8	14,6	0	0
	Эксперимент	12	12	11	14	0	0

Таблица 3.17

Суммарные углы подгибки элементов

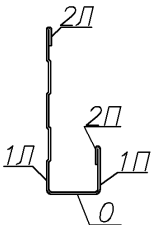
Конфигурация профиля	Переход	Углы подгибки элементов, град			
		1л	2л	1п	2п
	1	-198	-270	18	90
	2	-215	-345	35	165
	3	-230	-410	50	230
	4	-245	0	65	0
	5	-260	0	80	0
	6	-272	0	92	0

Таблица 3.18

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметр		Номер перехода											
		1		2		3		4		5		6	
Jр, мм ⁴ (левая полка)		24638		24741		24876		24979		24945		24789	
Jр, мм ⁴ (правая полка)		800		765		764		775		774		761	
Исходная толщина, мм		0,7											
Сэкв, мм (левая полка)		0,93		0,93		0,94		0,94		0,94		0,94	
Сэкв, мм (правая полка)		1,37		1,31		1,32		1,33		1,33		1,31	
Протяженность ЗПП, мм (левая полка)	Расчет	286,7		271,4		257,2		257,2		257,2		241,3	
	Эксперимент	249		251		227		202		212		209	
Протяженность ЗПП, мм (правая полка)	Расчет	38,9		37,4		33,6		33,6		33,6		31,2	
	Эксперимент	32		33		29		28		27		26	
Протяженность ЗПП элемента (2л, 2п), мм	Расчет	25,7		23,6		21,2		0		0		0	
	Эксперимент	26	24	23	21	22	19	-	-	-	-	-	-

Таблица 3.19

Суммарные углы подгибки элементов

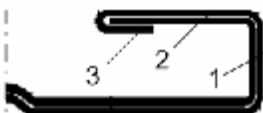
Конфигурация профиля	Переход	Углы подгибки элементов, град		
		1п	2п	3п
	0	10	15	40
	1	10	20	90
	2	20	40	160
	3	30	55	235
	4	45	90	-
	5	75	140	-
	6	90	180	-

Таблица 3.20

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметр		Номер перехода						
		0	1	2	3	4	5	6
Jp, мм ⁴ (правая полка)		743	676	581	532	508	485	459
Исходная толщина, мм		0,6						
Сэкв, мм (правая полка 1)		1,67	1,65	1,38	1,2	1,14	1,09	1,03
Протяженность ЗПП, мм (правая полка1)	Расчет	21,3	0	25,1	27,5	32,4	46,3	35,2
	Эксперимент	18	9	22	24	30	36	29
Протяженность ЗПП элемента (3п), мм	Расчет	12,2	15,9	17,4	18,7	0	0	0
	Эксперимент	10	14	15	16	0	0	0

На рис. 3.33 представлено изображение зон плавного перехода С-образного профиля с отбортовками, откуда видно, что в целом, протяженность ЗПП достаточно хорошо соответствует ее расчетным значениям, полученным на основе метода локальных жесткостей.

На рис. 3.34 представлены суммарные углы подгибки и конфигурация исследуемого профиля, имеющего периферийные элементы жесткости: отбортовку и ЭДТ. Этот профиль фирмы Rehau изготовлен по схеме 3.32-1. На рис. 3.34 видно, что углы подгибки левой и правой несущих полок примерно одинаковы, хотя ширина отбортовки и ЭДТ различаются существенно. Это свидетельствует о том, что отбортовка весьма существенно повышает жесткость подгибаемой полки, что позволяет избегать значительной скрутки профиля. Результаты исследования представлены в табл. 3.21.

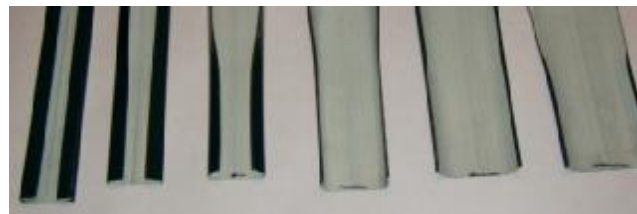


Рис. 3.33. ЗПП С-образного профиля с ЭДТ

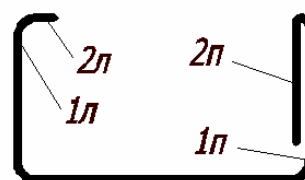
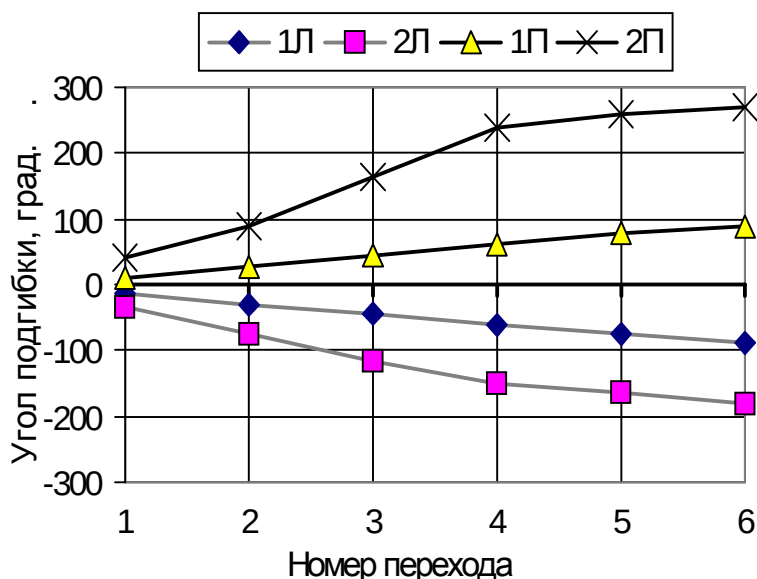


Рис. 3.34. Суммарные углы подгибки и конфигурация исследуемого профиля с периферийными элементами жесткости

Таблица 3.21

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметр		Номер перехода					
		1	2	3	4	5	6
Жр, мм ⁴ (правая полка)		4906	4898	4928	4963	5168	5446
Жр, мм ⁴ (правая полка)		18062	15902	9062	6480	6480	6480
Исходная толщина		1,5					
Сэкв, мм (левая полка)		1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	2,0
Сэкв, мм (правая полка)		6,7	5,9	3,4	2,4	2,4	2,4
Протяженность ЗПП, мм (левая полка)	Расчет	56,2	56,2	56,2	56,2	54,6	52,8
	Экспер.	59	52	53	48	49	47
Протяженность ЗПП, мм (правая полка)	Расчет	29,5	30,5	40,9	47,2	47,2	47,2
	Экспер.	27	31	38	44	45	43
Протяженность ЗПП элемента (2л), мм	Расчет	17,4	17,4	17,4	17,4	-	-
	Экспер.	16	15	14	15		
Протяженность ЗПП элемента (2п), мм	Расчет	68,6	68,6	68,6	68,6	-	-
	Экспер.	66	64	63	61	-	-

Данные табл. 3.21 показывают, что различие теории и эксперимента лежит в пределах 20%, что представляется удовлетворительным.

В табл. 3.22 и 3.23 приведены углы подгибки и полученные расчетные и экспериментальные данные профиля, формуемого по схеме 3.32-2. Данный профиль применяется для кровли зданий и имеет условное название «авто-фальц». Особенностью его конструкции является наличие рифтов, ЭДТ и петельного элемента с левой стороны. Следует отметить, что по технологии ТП этот профиль изготавливается не менее чем за 8 – 10 переходов, в то время как технология МИД требует всего шести переходов.

Таблица 3.22

Суммарные углы подгибки элементов

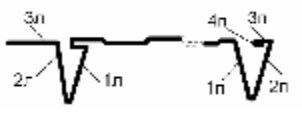
Конфигурация профиля	Переход	Углы подгибки элементов, град						
		1л	2л	3л	1п	2п	3п	4п
	1	-10	20	45	-15	18	36	90
	2	-20	45	90	-29	30	55	145
	3	-30	60	135	-45	45	75	0
	4	-40	72	180	-60	55	90	0
	5	-65	72	180	-75	65	155	0
	6	-80	72	180	-80	72	185	0

Таблица 3.23

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметр		Номер перехода					
		1	2	3	4	5	6
Jp, мм ⁴ (1л)		81969	61299	40191	24320	15375	11419
Jp, мм ⁴ (2л)		18657	18446	18032	17450	15411	13852
Jp, мм ⁴ (правая полка)		40464	34348	25783	18545	12034	9868
Исходная толщина, мм				0,6			
Сэкв, мм (1л)		9,11	6,81	4,47	2,70	1,71	1,27
Сэкв, мм (2л)		3,58	3,54	3,46	3,35	2,96	2,66
Сэкв, мм (правая полка)		7,77	6,60	4,95	3,56	2,31	1,89
Протяженность ЗПП, мм (1л)	Расчет	52,3	61,2	59,4	59,4	-	-
	Эксперимент	48	53	54	55	-	-
Протяженность ЗПП, мм (2л)	Расчет	42,3	42,3	44,1	44,1	64,6	56,2
	Эксперимент	38	36	41	39	56	47
Протяженность ЗПП, мм (правая полка)	Расчет	36,4	38,3	46,2	51,4	59,8	39,7
	Эксперимент	29	33	39	45	52	32
ЗПП периферийного элемента (3л), мм	Расчет	117,2	54,1	52,6	58,3	67,8	59,2
	Эксперимент	105	51	48	54	62	51
ЗПП периферийного элемента (4п), мм	Расчет	11,6	8,7	8,1	-	-	-
	Эксперимент	12	10	7	-	-	-

Из табл. 3.23 следует, что теоретическое значение ЗПП имеет удовлетворительное согласие с экспериментальными значениями в пределах 20%.

Ф-образный профиль изготавливали по схеме рис. 3.32-4 с суммарными углами подгибки, данными в табл. 3.24 [158]. Результаты даны в табл. 3.25.

Таблица 3.24

Суммарные углы подгибки элементов

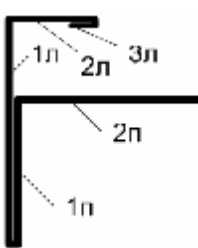
Конфигурация профиля	Переход	Углы подгибки элементов, град				
		1л	2л	3л	1п	2п
	1	185	192	192	11	5
	2	190	210	270	16	5
	3	205	230	355	26	5
	4	218	253	253	45	5
	5	240	310	310	67	-8
	6	257	342	342	73	-17
	7	275	365	365	85	-5

Таблица 3.25

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметры		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	7
Jp, мм ⁴ (левая полка)		43253	42272	40905	39189	35002	34084	33840
Jp, мм ⁴ (правая полка)		59122	58458	56908	49379	43179	34765	34322
Сэкв, мм (левая полка)		1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5
Сэкв, мм (правая полка)		2,7	2,6	2,5	2,2	1,9	1,6	1,5
Исходная толщина, мм		0,7						
Протяженность ЗПП, мм (левая полка)	Расчет	87,5	87,5	137,5	150,2	171,3	159,1	163,7
	Эксперимент	68	94	112	154	158	142	146
Протяженность ЗПП, мм (правая полка)	Расчет	60,5	50,6	60,5	90,8	104,8	57,9	85,6
	Эксперимент	64	53	58	105	110	50	76
Протяженность ЗПП элемента (3л), мм	Расчет		15,2	14,3	15,2	-	-	-
	Эксперимент	0	17	12	13	-	-	-
Протяженность ЗПП элемента (2п), мм	Расчет	144,3	144,3	144,3	159,4	212,5	144,3	143,1
	Эксперимент	139	132	137	144	189	126	131

Как и в предыдущих случаях, получено достаточно хорошее соответствие теории и эксперимента (отклонения не превышают 16%).

Н-образный профиль изготавливали по схеме рис. 3.32-7 с суммарными углами подгибки, указанными на рис. 3.35. Результаты исследований представлены в табл. 3.26, откуда видно удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Примерно такие же результаты получены и при исследовании профиля направляющей «трек», формируемого по

схеме рис. 3.32-6 (из-за громоздкости не приводятся). Следует отметить, что протяженность ЗПП при большой жесткости «надстройки» весьма мала и формообразование профиля скорее приближено к схеме формовки, чем к схеме традиционного профилирования, где осуществляется подгибка полок.

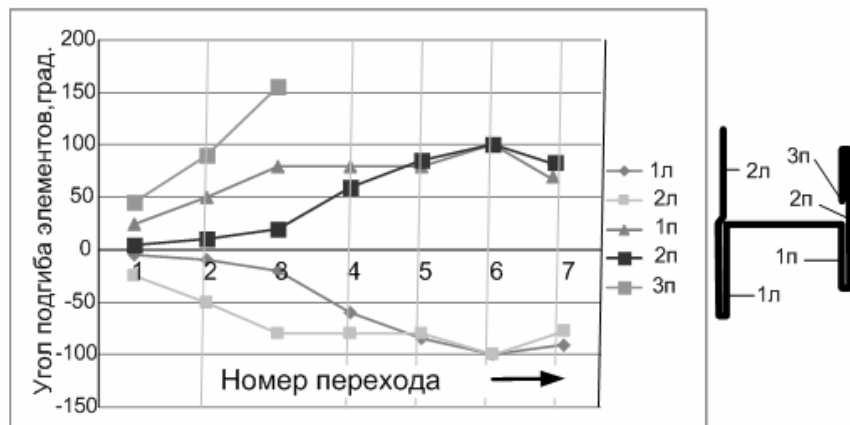


Таблица 3.26

Расчетные и экспериментальные значения ЗПП

Параметр		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	7
Jр, мм ³ (левая полка)		5325	4576	2989	1362	793	643	644
Jр, мм ³ (правая полка)		4230	3135	1808	904	505	388	390
Исходная толщина, мм		0,6						
Сэкв, мм (левая полка)		15,9	13,7	8,9	4,1	2,4	1,9	1,9
Сэкв, мм (правая полка)		12,6	9,4	5,4	2,7	1,5	1,1	1,2
Протяженность ЗПП, мм (левая полка)	Расчет	9,7	14,1	16,3	0	0	15,6	15,6
	Эксперимент	7	12	13	6	5	14	12
Протяженность ЗПП, мм (правая полка)	Расчет	6,2	10,1	11,9	0	0	15,4	15,8
	Эксперимент	4	8	7	4	6	16	11
Протяженность ЗПП элемента (Зп), мм	Расчет	47,8	40,2	46,8	35,2	0	0	0
	Эксперимент	42	37	38	26	0	0	0
Протяженность ЗПП элемента (2л), мм	Расчет	133,7	133,7	170,2	135,1	94,4	86,3	84,1
	Эксперимент	138	118	146	124	95	71	69

Таким образом, при умеренной ширине полок (менее $30s_0$) с использованием метода локальных жесткостей модель (2.105) может применяться для определения протяженности ЗПП при формообразовании полузакрытых профилей. В целом, ошибка не превышает 20%.

На рис. 3.36 приведены образцы панелей профилей дверного обрамления, откуда видно, что протяженность ЗПП несущих полок на различных переходах весьма незначительна по сравнению протяженностью ЗПП периферийных элементов.

Экспериментальное исследование ЗПП С-образных профилей значительных размеров сечения выполнено в работе [19] и в данной книге они не рассматриваются. Если во всех рассмотренных выше схемах формообразования протяженность ЗПП не превосходила величины межклетьевого расстояния, то в случае профилей с широкими полками (элементами) протяженность ЗПП может быть больше величины межклетьевого расстояния. Это вызывает трение торцов заготовки по вертикальным замыкающим элементам верхних роликов и наружных поверхностей заготовки по вертикальным элементам нижних валков последних переходов из-за распространения очага деформации до роликовой пары предыдущего перехода. Также возможна переформовка зон изгиба и отгиб периферийных элементов во внутрь (поднутрение).

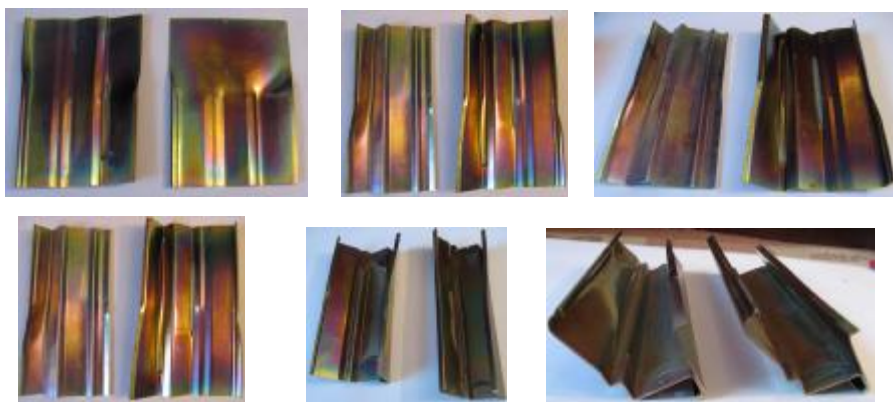


Рис. 3.36. Зоны плавного перехода двух модификаций профилей обрамления двери, вырезанные из заготовок в межклетьевом пространстве профилировочного станка

Поэтому в сомнительных случаях следует выполнять проверку схемы по критерию предельных углов подгибки (2.106) для каждого из переходов на основе соотношения:

$$L(\theta) \leq L_m, \quad (3.6)$$

где левая часть неравенства (3.6) определяется формулой (2.105), а правая часть является межклетьевым расстоянием профилировочного станка.

При выполнении условия (3.6) для всех переходов схема формообразования может считаться пригодной, в противном случае она подлежит пересмотру в сторону увеличения числа переходов или замены профилировочного станка.

3.4.2. Эффект прогиба дна профиля и «ослабления» углов подгибки [156]

В разделе 3.3 было показано, что при жестком дне заготовки с рифтами требуется назначать менее жесткие режимы подгибки полок, чем в случае гладкого дна. Это означает, что при формообразовании профилей с широким

дном в модели протяженности ЗПП (раздел 2.4) следует учитывать влияние ширины его дна (см. рис. 2.22 и 2.23) с целью сокращения числа переходов [140]. Этот эффект, названный нами эффектом «желобчатости», исследован в отношении швеллерных профилей [19], однако для полузакрытых профилей такие исследования ранее не проводились.

С использованием сборной оснастки, позволяющей изменять ширину дна профиля, проводили исследования на С-образных профилях с шириной дна от 50 до 210 мм толщиной от 0,7 до 1,5 мм, шириной подгибаемой полки 45 мм и шириной периферийного элемента 13 мм. Применяли схему формообразования согласно рис. 3.20-б.

Использовали методику работы [19]. В качестве измерительного устройства применяли индикатор часового типа (ГОСТ 577-68) с диапазоном измерения до 5 мм и точностью 0,01 мм, который монтировался на специальной стойке с возможностью продольного и поперечного перемещения (рис. 3.37).



Рис. 3.37. Индикатор часового типа и его монтаж на стойке для замера величины прогиба донной части профиля

На рис. 3.38 показаны усредненные значения прогиба дна от толщины заготовки для переходов с одним и тем же углом подгибки. Максимальная среднеквадратичная ошибка в сериях пятикратных измерений не превышала 0,08 мм. Измерения проводили при остановленном приводе профилировочного станка. Следует отметить, что при движении заготовки прогибы донной части в два-

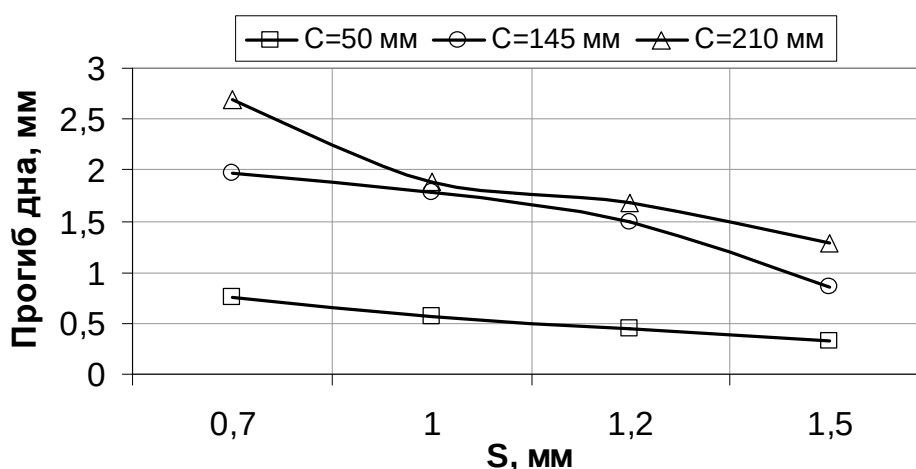


Рис. 3.38. Зависимость прогиба дна от толщины заготовки при угле подгибки 15° за переход С-образного профиля Сх45х13 мм

три раза превышают значения, приведенные на рис. 3.38. Это объясняется релаксацией напряжений заготовки, которая при останове станка переходит в упругое состояние. Измерение прогибов при движении заготовки дает существенные погрешности из-за ее колебаний в межклетьевом пространстве.

Характер распределения прогибов в пределах ЗПП перед текущим переходом иллюстрирует рис. 3.39 в форме сглаженных в пакете EXCEL кривых, построенных на экспериментальных данных. Кривые прогиба представляют собой «горку» с максимальным значением прогибов примерно на уровне контакта подгибаемых полок профиля с формирующим инструментом. Отсчет координаты ведется от вертикальной осевой плоскости текущей пары роликов в сторону, обратную движению заготовки.

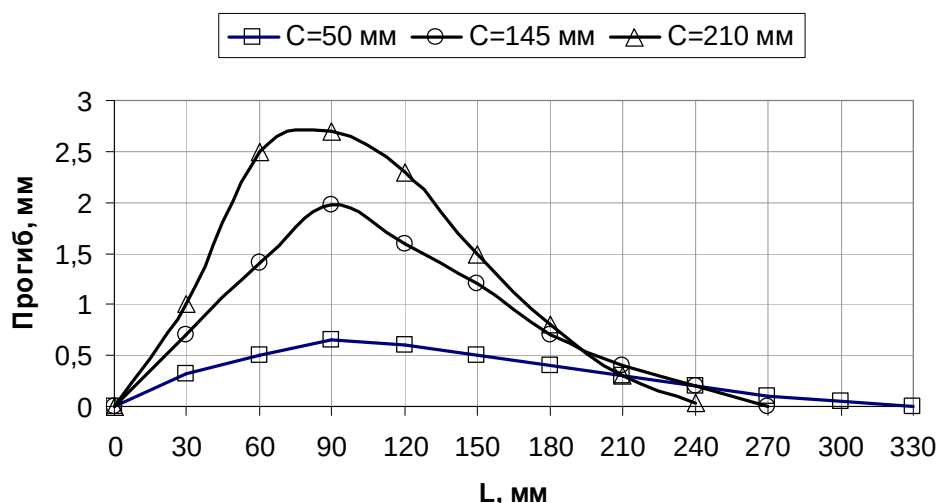


Рис. 3.39. Форма прогиба донной части С-образного профиля Сх45х13 мм в вертикальной плоскости, содержащей ось профилирования

Экспериментальные значения в целом согласуются с результатами аналогичных исследований на швеллерных профилях [19], однако наличие горизонтальной полки в С-образном профиле уменьшает протяженность ЗПП основной подгибаемой полки примерно в 1,5 раза. Прогиб донной части по сравнению с той же характеристикой при изготовлении швеллеров аналогичных габаритных размеров сечения и толщины стенок примерно на 40% выше. Это означает, что увеличение жесткости подгибаемых полок и ширина дна профиля должны быть учтены при проектировании технологии путем выполнения расчетов углов «ослабления» согласно процедуре, указанной в разделе 2.5 или работе [140] с применением метода локальных жесткостей, опи-

санного выше в данном разделе. Итак, из данного рассмотрения следует: 1. Полузакрытые профили С-образного типа могут изготавливаться по более жестким схемам формообразования, чем аналогичные (по габаритам сечения и толщине стенки) профили швеллерного типа; 2. Профили с широким дном могут изготавливаться по более жестким режимам по сравнению с режимами производства профилей с узким дном (т.е., приемственность технологии может соблюдаться только при увеличении ширины донной части профиля).

3.5. Потеря устойчивости и влияние элементов жесткости

В разделе 2 было показано, что кромковая волнистость может возникать на периферийных элементах профиля. Однако в отличие от швеллерных профилей, где подгибка осуществляется относительно дна профиля, в многоэлементных профилях подгибка осуществляется относительно подгибаемой полки, которая сама подвержена продольной деформации. При этом, в первом случае подгибка осуществляется боковыми коническими участками роликов, а во втором случае на последних переходах подгибка может осуществляться цилиндрическими поверхностями роликов. Указанные два отличия требуют изучения зависимости

амплитуды кромковой волнистости на элементе, несомом вертикальной подгибаемой полкой, от факторов процесса формообразования с использованием полного факторного эксперимента (ПФЭ 2^3) [159]. В работе [19] установлено, что кромковая волнистость

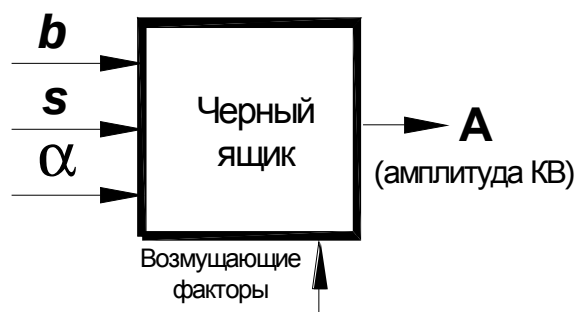


Рис. 3.40. Схема ПФЭ для исследования кромковой волнистости

определяется в основном шириной периферийного элемента b , его толщиной s и углом подгибки α , в то время как другие факторы (механические свойства материала заготовки, межклетьеовое расстояние и ряд других) являются второстепенными. Схема исследования представлена на рис. 3.40 и в табл. 3.27. Выбор диапазона изменения факторов процесса обусловлен размерами элементов наиболее применяемых профилей и характерными для них углами подгибки. Тогда модель процесса можно представить функцией отклика:

$$y = f(b, s, \alpha). \quad (3.7)$$

Таблица 3.27

Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни и интервал варьирования факторов	Значения факторов		
	X ₁ (b, мм)	X ₂ (s, мм)	X ₃ (α, град.)
Основной уровень (0)	30	0,8	40
Интервал варьирования	10	0,2	10
Нижний уровень(-1)	20	0,6	30
Верхний уровень(+1)	40	1,0	50

Эксперименты проводили на станке СПУ-400 с использованием сборной оснастки для производства С-образных профилей. Измерение амплитуды кромковой волнистости производили с помощью установки рис. 3.37. Результаты экспериментов и расчетов приведены в табл. 3.28.

Таблица 3.28

План и результаты ПФЭ 23

№	Основные столбцы			Вспомогательные столбцы				Выход процесса				Дисперсия
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₂ X ₃	X ₁ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	y _{1u1}	y _{1u2}	y _{1u3}	y _{1u}	s ² (y _{ku})
	b	s	α									
1	-	-	-	+	+	+	-	1,16	1,22	1,12	1,167	0,0025
2	+	-	-	-	+	-	+	2,74	2,86	2,84	2,813	0,0041
3	-	+	-	-	-	+	+	0.21	0,14	0,05	0,133	0,0064
4	+	+	-	+	-	-	-	1,64	1,68	1,72	1,68	0,0016
5	-	-	+	+	-	-	+	2,68	2.84	2,75	2,757	0,0064
6	+	-	+	-	-	+	-	6,62	4,68	4,76	4,687	0,049
7	-	+	+	-	+	-	-	2,93	3,15	3,08	3,053	0,0130
8	+	+	+	+	+	+	+	4,13	4,20	4,18	4, 17	0,0013

В каждом опыте применялась трехкратная повторяемость. Среднее значение и построчные дисперсии воспроизводимости подсчитывали по формуле:

$$\bar{y}_u = \sum_{k=1}^n y_{ku} / n; S^2_{(yku)} = \sum_{k=1}^n (y_{ku} - \bar{y}_u)^2 / (n-1), \quad (3.8)$$

где n – повторяемость при измерении параметра $\bar{y}_u$; k – номер повтора опыта в каждой строке; u – номер строки в плане эксперимента.

Среднюю дисперсию воспроизводимости находили по формуле:

$$S_{(y)}^2 = \sum_{u=1}^N \sum_{k=1}^n (y_{ku} - \bar{y}_u)^2 / N(n-1) \cdot n. \quad (3.9)$$

Дисперсию коэффициентов уравнения регрессии и ошибку коэффициентов регрессии определяли по формулам:

$$S_{(bi)}^2 = S_{(y)}^2 \cdot N^{-1}; \quad S_{(bi)} = \sqrt{S_{(bi)}^2}. \quad (3.10)$$

По результатам поставленного по этому плану эксперимента рассчитывали восемь коэффициентов уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (3.11)$$

Коэффициенты b_i считали значимыми при выполнении условия:

$$|b_i| > t \sqrt{S_{(bi)}^2}, \quad (3.12)$$

где величина t – критерий Стьюдента (для данного случая он равен 2,12). Уровень значимости принимали 0,05.

Все расчеты на основании зависимостей (3.7) – (3.12) были произведены в пакете MathCAD2001Pro [159]. Полученные значения коэффициентов в формуле (3.11): $b_0 = 2,56$; $b_1 = 0,78$; $b_2 = -0,30$; $b_3 = 1,11$; $b_{12} = -0,11$; $b_{13} = 0,24$; $b_{23} = 0$; $b_{123} = -0,09$.

По расчетной зависимости (3.11) построен график зависимости амплитуды кромковой волнистости от ширины полки и угла подгибки на основном уровне варьирования толщины заготовки (рис. 3.41). Величину деформации в этом случае можно определить по рис. 2.28 при известном значении шага

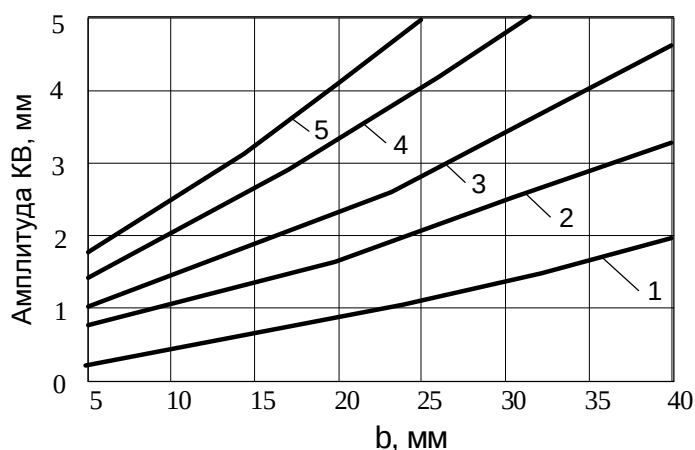


Рис. 3.41. Зависимость амплитуды кромковой волнистости от ширины полки и угла подгибки при $s = 0,8$ мм: 1, 2, 3, 4, 5 – углы подгибки 10, 20, 30, 40 и 50 градусов соответственно

волны. Значения амплитуды кромковой волнистости в пределах 30% коррелируют с экспериментальными данными работ [19, 160], полученными на швеллерах, хотя имеются два указанных выше различия в условиях формовки соответствующих элементов. Рис. 3.41 может быть использован для определения в первом прибли-

жении предельного угла подгибки периферийного элемента при заданном ограничении на амплитуду кромковой волнистости.

Выводы

1. Исследование изменения толщины угловых зон несимметричных полузакрытых профилей показало, что на переходах с преимущественной схемой растяжения имеет место утонение порядка 5 %, а при подсадке – утолщение до 4 %. Отличие теоретических значений от экспериментальных менее 6 %.

2. Изучение формовки симметричного профиля и многоэлементного профиля позволило выявить преимущественное суммарное утонение заготовки до 12% при неравномерном характере изменения толщины по переходам. Исследования позволили установить упрощенную формулу расчета приращения заготовки для схем формообразования с преимущественным растяжением. Расхождение теоретических и экспериментальных данных лежит в пределах 21 %.

3. Экспериментальное изучение микротвердости по сечению профилей показало увеличение микротвердости угловых зон от 12 до 22 %, а по теоретическому прогнозу упрочнение должно было бы достигать 15 %, что позволяет считать теоретическую модель пригодной для практических расчетов.

4. Моделирование подсадки в среде Ansys позволило определить зависимости относительного радиуса, утонения и пружинения в зависимости от величины подсадки, выявить рекомендуемые области подсадки. Показано, что при подсадке наружный контур зоны изгиба разгружается в 2,0...2,5 раза по деформациям, что дает возможность получать радиусы изгиба меньше допустимых.

5. Изучение формовки множественных гофр в донной части профиля позволило подтвердить справедливость теоретической модели допустимого числа переходов при ограничении на утонение. Уровень рассогласования теории и эксперимента не превышает 16 %.

6. Формовка рифтов в донной части профиля повышает склонность полок с элементами жесткости к потере устойчивости в виде периодического излома подгибаемой полки. Установлено, что равномерная формовка рифта по переходам или натяг кромки позволяют получать качественный профиль

без существенного изменения схемы формообразования аналогичного профиля с гладким дном.

7. Исследование формообразования глубоких комбинированных рифтов при заданном ограничении на утонение позволило выработать рекомендации по схемам формообразования таких профилей. В отсутствие жестких требований к утонению возможно использование параллельной формовки, в отличие от последовательной формовки в предыдущем случае.

8. Экспериментальное исследование ЗПП девяти полужакрытых профилей различных конфигураций подтвердило применимость модели ЗПП и метода локальных жесткостей для расчета протяженности ЗПП полужакрытых профилей. Расхождение теоретических и экспериментальных данных по исследуемому массиву профилей лежит в пределах 16...26 %.

9. Изучение прогибов донной части широких полужакрытых профилей дало возможность уменьшения числа переходов по сравнению с числом переходов, применявшимся при изготовлении профилей с узким дном. Результаты исследования показывают уменьшение по сравнению со швеллерами в 1,5 раза протяженности ЗПП и увеличение на 40% глубины прогиба, обусловленные наличием элементов жесткости, что подлежит учету при проектировании процесса.

10. Регрессионная модель, полученная на основе полного факторного эксперимента 2^3 , позволяет определять предельные углы подгибки, приводящие к кромковой волнистости.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО

Результаты исследований формообразования полузакрытых профилей дают возможность определить стандартную процедуру проектирования технологии их производства МИД и разработки технологического оснащения. По отношению к ранее использовавшейся процедуре проектирования [19, 4] предлагается новый алгоритм разработки технологии, существенно изменяющий последовательность этапов проектирования. Это обусловлено проблемами расположения в валках многоэлементных профилей, расчетом утонения и ширины заготовки после установления схемы формообразования, выбором оборудования [153, 158].

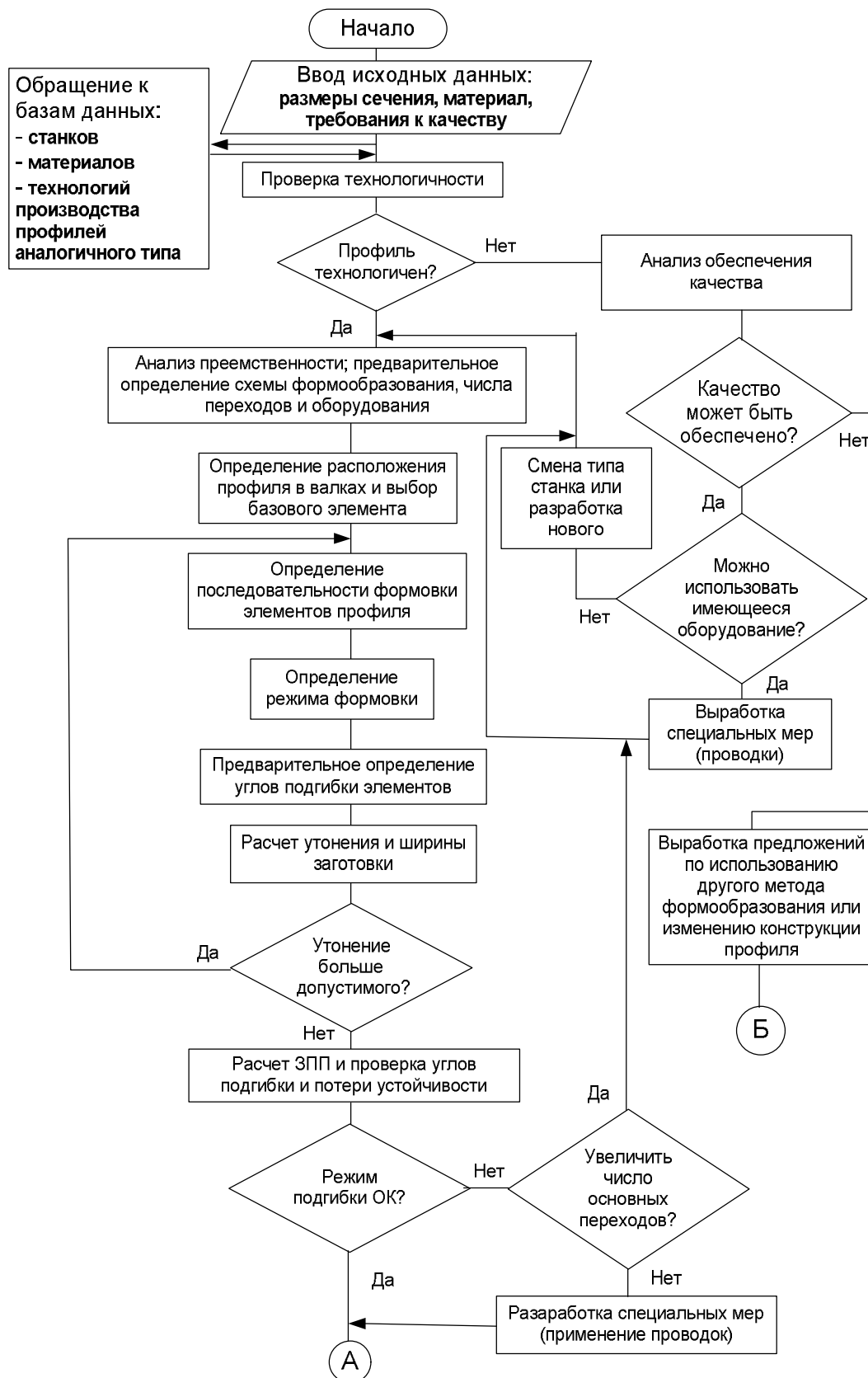
4.1. Новый алгоритм разработки технологии производства полузакрытых профилей

В работе [19] показано различие последовательности этапов проектирования технологий ТП и МИД для производства профилей типовой номенклатуры. Характерные признаки ранее применявшейся процедуры: расчет ширины заготовки по конечному сечению (без учета схемы формообразования); число клеток, расположение профиля в валках, форма и положение основной оси профиля, выбор углов подгибки зависели от опыта разработчика. Данный подход часто приводит к ошибкам, устраняемым при отработке технологии.

С учетом результатов проведенных в данной работе исследований предлагается новый алгоритм разработки технологии производства МИД полузакрытых профилей (рис.4.1), учитывающий расположение профиля в валковых калибрах и выбор базового элемента [158, 52], изменение порядка расчета утонения и ширины заготовки после определения схемы формообразования [133], выбор профилировочного оборудования [161], а также иные расчетные зависимости процесса: протяженность ЗПП, влияние подсадки и пр.

При оценке *технологичности* профиля руководствуются общими принципами [4,19, 27] с учетом ширины подгибаемой полки для удовлетворения условию прохождения по межосевому расстоянию профилирующей клетки. При этом производится оценка по различным критериям [4, 19] как с точки зрения возможности получения данной конфигурации сечения профиля при заданных параметрах технологических свойств основного металла и покрытия, так и с

точки зрения использования имеющегося в наличии оборудования (см. ветвление вправо от блока оценки технологичности на рис. 4.1).



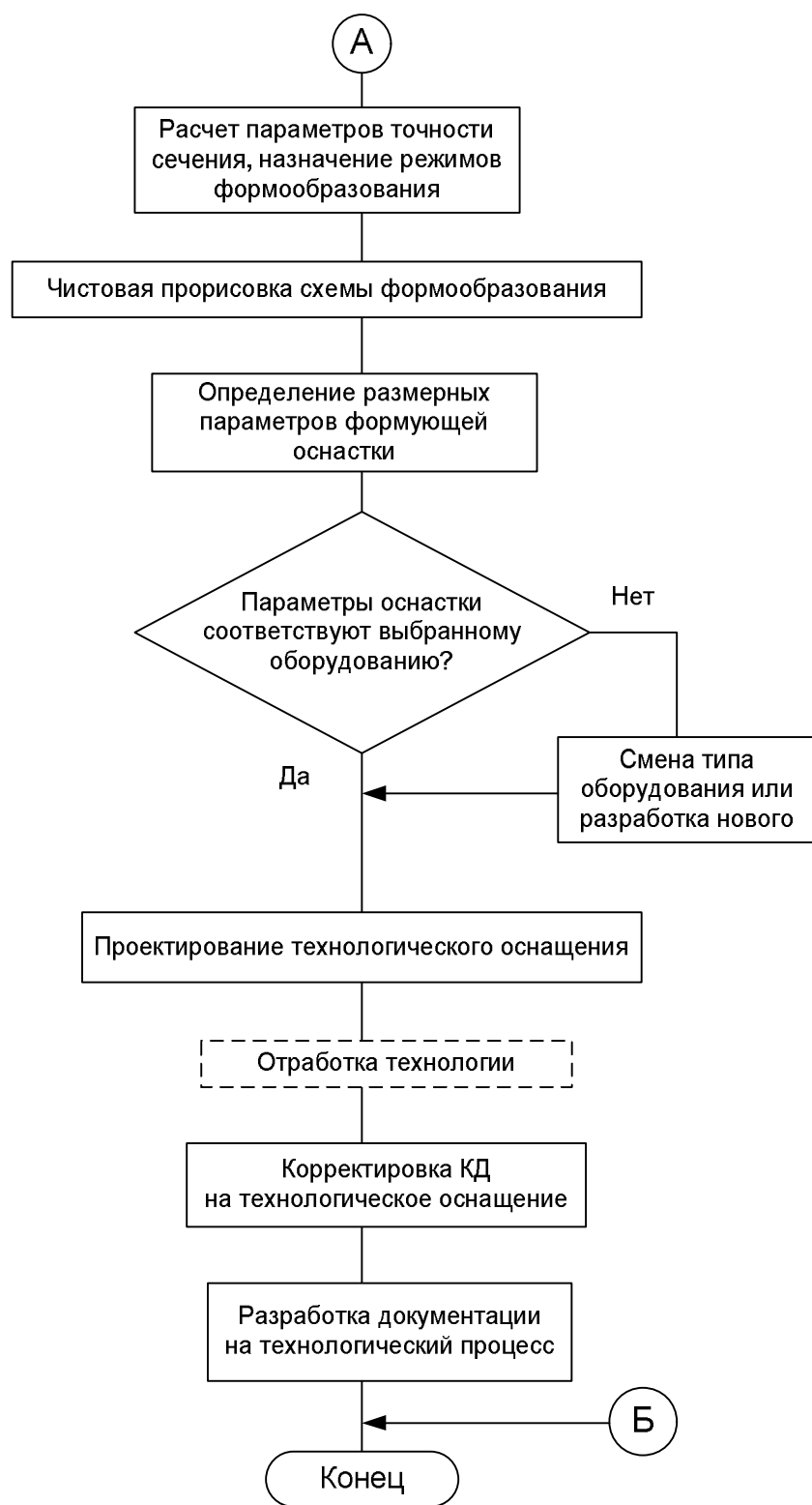


Рис. 4.1. Алгоритм разработки технологии изготовления полузакрытого профиля

Преимуществом технологии позволяет использовать банк типовых технических решений для разработки новых технологий. При этом одновременно решаются вопросы расположения профиля в валках, определения принципа и последовательности формовки, числа переходов и углов подгибки. Все указанные вопросы полностью решены для профилей типовой номенклатуры

[19]. Рассмотрение специфичных вопросов технологии полузакрытых профилей вынесено в данном разделе в отдельные подразделы ниже по тексту.

Принцип и последовательность формовки. Известны три принципа формовки [43, 41, 27] зон изгиба: 1) с постоянным радиусом и приращением криволинейных участков за счет периферийных элементов; 2) с постоянным радиусом и приращением криволинейного участка за счет серединной части профиля; 3) с монотонным уменьшением радиуса изгиба по переходам. Первые два принципа формовки применяются в МИД в зависимости от схемы формообразования, причем, в большинстве случаев в их комбинации. Третий принцип непригоден из-за невозможности обеспечения размерной точности профиля при высвобождении в калибре и увеличения числа переходов.

Формовка элементов профиля может осуществляться последовательно, параллельно или по комбинированной схеме в зависимости от требований к профилю и выбранной схемы формообразования. Эти виды последовательности формовки могут комбинироваться с указанными выше принципами формовки [149, 153]. Примеры таких комбинаций рассмотрены в разд. 3.3.3 книги, где приводятся рекомендации по их осуществлению.

Число переходов. Для полузакрытых профилей произвольного типоразмера модели числа переходов отсутствуют. Однако конфигурацию сечения профиля можно привести к эквивалентной конфигурации швеллерного или С-образного типа для определения числа переходов на основе полуэмпирической модели [19]:

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos \alpha)}{L_M \cdot n} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_g \cdot s}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.1)$$

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.

В формуле (4.1) первый сомножитель в квадратных скобках отражает влияние формы дна заготовки профиля, второй – степень «стеснения» заготовки, третий – жесткость угловой зоны. Функция формы F для С-образных профилей определяется соотношением [19]:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{C + b \cdot \cos \alpha}{C + b \cdot \cos \alpha - g}, \quad (4.2)$$

где g – ширина горизонтальных полок профиля.

Примеры использования моделей для расчета числа переходов формообразования полужакрытых профилей некоторых типов приведены в наших работах [153, 52, 139]. Так, для профиля с ЭДТ (рис. 3.32-5) выбор числа переходов в зависимости от параметров сечения произ-

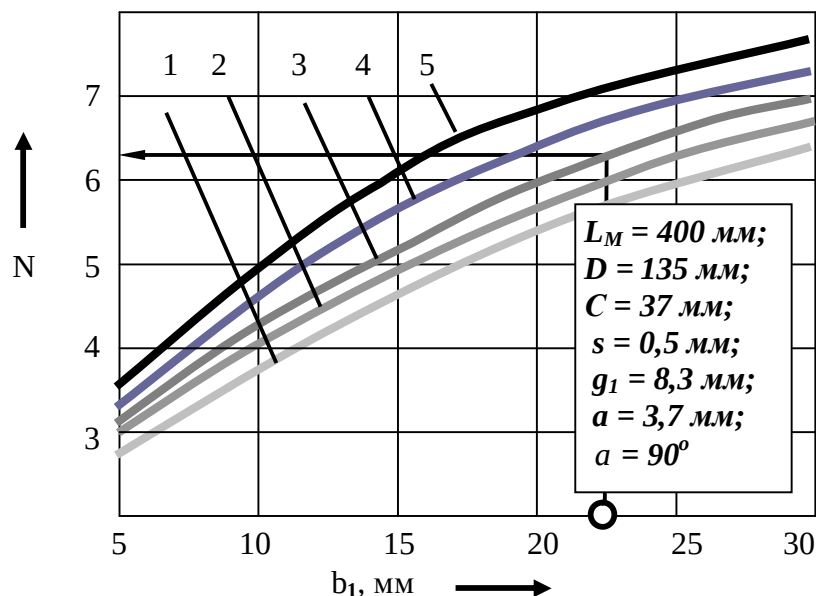


Рис. 4.2. Определение числа переходов:
1 – 5 – $g_B = 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0$ мм соответственно

водили по рис. 4.2, выполненному с помощью прикладной программы MathCAD2001Pro на основе формул (4.1) – (4.2) [153]. При этом в расчетах, относящихся к ЭДТ, введены следующие процедуры предварительного определения параметров и условий: 1. Функцию формы определяют как для С-образного профиля с гладкими горизонтальными полками, уменьшенными на величину элемента двойной толщины; 2. Ширину подгибаемого элемента берут равным номинальному значению суммарной ширины подгибаемых полок; 3. При наличии рифтов в донной части ее следует считать абсолютно жесткой; 4. Межклетьевое расстояние в расчетной формуле (4.1) принимают равным межклетьевому расстоянию базового профилировочного станка, предназначенного для изготовления данного профиля. 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. Окончательно, число переходов назначают в соответствии с формулой: $N = \text{Integer}(N) + 1$.

Ширина заготовки для формообразования полужакрытых профилей может быть определена на основе формул (2.1), (2.32) или (3.1) с учетом схемы формообразования и результатов проведенных исследований (см. разделы 2.3 и 3.2 книги).

Протяженность ЗПП. Расчет протяженности ЗПП выполняется для периферийных подгибаемых элементов в соответствии с моделью (2.105) с использованием метода локальных жесткостей раздела 3.4 книги. Полученный результат для каждого из переходов сравнивается с межклетьевым расстоянием предполагаемого к использованию профилировочного оборудования. Протяженность ЗПП не должна превышать величину межклетьевого расстояния станка во избежание переформовки элементов профиля, что дает возможность для каждой из конфигураций установить предельные углы подгибки элементов.

Потеря устойчивости элементов профиля. В общем случае, для оценки потери устойчивости можно использовать модель, в которой потеря устойчивости прогнозируется индикаторной функцией [27]. Однако данный критерий разработан для профилей типовой номенклатуры и одного вида потери устойчивости – кромковой волнистости. Тем не менее, профиль полузакрытого типа может быть редуцирован к типовому, а подгибаемые полки можно привести с помощью метода локальных жесткостей к плоской эквивалентной полке, для определения устойчивости которой можно воспользоваться критериями раздела 2.5. Вообще же, специальных и всеобъемлющих критериев потери устойчивости элементов для профилей произвольных типоразмеров пока не существует.

Рассмотрим другие наиболее важные этапы проектирования технологии, отличающиеся рядом особенностей в изготовлении полузакрытых профилей.

4.2. Расположение профиля в формующих валках

Общие принципы расположения профиля в валках сформулированы в работе [19]. Рассмотрим примеры расположения профиля в валках для двух наиболее сложных многоэлементных профилей, рассмотренных в разделе 3.

Ф-образный профиль. На рис. 4.3 представлены возможные варианты расположения в последней клетке Ф-образного профиля [158], формуемого по

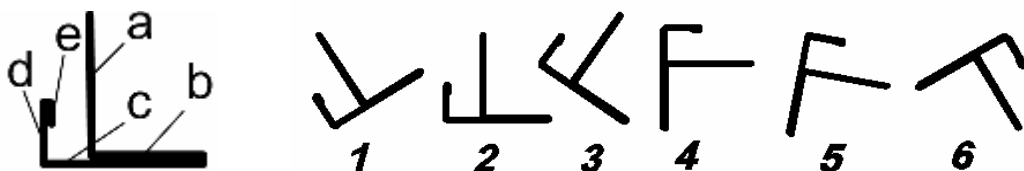


Рис. 4.3. Варианты расположения профиля в роликах последней клетки

схеме рис. 3.32-4. Представленные виды расположения выбраны дискретно с относительно равномерным варьированием угла поворота в пределах 180° .

Вариант 1 предполагает развертку элементов «а» и «б» вверх, для чего потребовались бы ролики весьма больших диаметров. Вариант 2 обладает тем недостатком, что подгибка осуществляется лишь с одной стороны, причем, в ряде клеток – по полузакрытой схеме. Более того, периферийный элемент «а», имеющий относительную длину около 50, подвержен кромковой волнистости при малом числе переходов. В этом случае потребовалось бы 12 – 14 переходов для обеспечения качественной формовки элемента двойной толщины. Вариант 3 фактически определяет свободную гибку элементов «б», «с» и «д» на последних переходах, что неблагоприятно сказывается на параметрах точности профиля, вызывая раскрытие элементов двойной толщины и депланацию элементов профиля. Вариант 4 исключает последний переход из процесса формообразования, поскольку при горизонтальном положении элемента «а» происходит раскатка его торца и возникают нарушения поверхности на элементе «с». Вариант 5 представляется наиболее приемлемым: подгибка осуществляется с двух сторон, а полузакрытая схема может иметь место лишь на последних переходах. Раскатка торца отсутствует, а срединный элемент двойной толщины подвергается обжиму в последнем переходе. Вариант 6 обладает тем же недостатком, что и вариант 1, только развертка элементов здесь осуществляется вниз.

На рис. 4.4 дана схема формообразования профиля по варианту 5 и приведены переходы 5 – 7 формовки, выполняемой по полузакрытой схеме.

Профиль обрамления дверей. Разработка технологии производства полузакрытых профилей с элементами двойной толщины (см. табл. 3.1) представля-

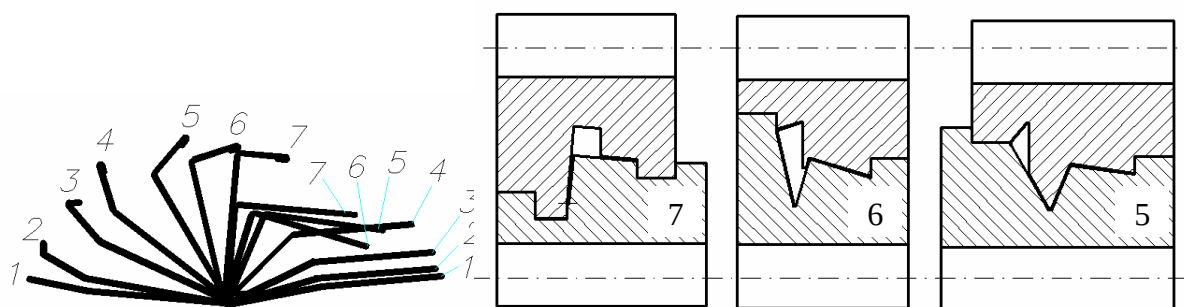


Рис. 4.4. Розеточная схема формообразования и валковые калибры с зонами высвобождения для изготовления F-образного профиля

ет собой далеко не тривиальную задачу [52]. На рис. 4.5 приведены восемь видов расположения окончательного сечения профиля в роликах с соответствующим выбором положения оси профилирования (отмечено перекрестьем).

В отличие от ТП, где ось профилирования располагают обычно по центру тяжести сечения профиля, при МИД ось профилирования имеет привязку к точке, подверженной наименьшему боковому перемещению. Рассмотрим последовательно представленные виды расположения сечения в роликах. Расположение сечения на рис. 4.5-1 дает возможность формовки элементов на первых переходах по открытой схеме. Однако на последних переходах левая часть профиля практически не подвержена деформированию, в то время как правая часть (с отсчетом от положения оси профилирования) подвержена значительной формовке. Более того, подгибаемая полка несет элементы жесткости, увеличивающие продольную деформацию правой части сечения. В дополнение к этому, замыкание калибров пришлось бы осуществлять на различных уровнях, что обычно приводит к различию линейных скоростей соответствующих зон формирующих роликов. Указанные обстоятельства не позволяют принять данный выбор.

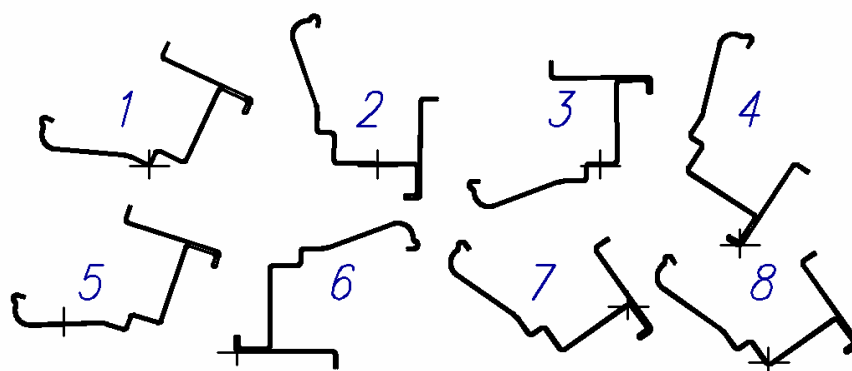


Рис. 4.5. Конфигурация полузакрытого профиля дверного обрамления

Расположение сечения на рис. 4.5-2 предполагает предварительную свертку правой части заготовки в элемент двойной толщины с последующей отгибкой вниз, когда неизбежно встречное движение верхнего ролика при контакте в межклетьевом пространстве, что весьма нежелательно ввиду возможности задиров и раскрытия элемента двойной толщины. Левая сторона профиля представляет собой участок значительной высоты, что потребует большой глубины «врезания» профиля с учетом расположения элемента двойной толщины. Вдобавок, замыкание калибров пришлось бы осуществлять также на различных уровнях, что доставляет различные линейные скорости правой и левой частям сечения профиля. Такое расположение профиля не является благоприятным.

Расположение сечения на рис. 4.5-3 требует, во-первых, замыкания роликов на различных уровнях. Во-вторых, правая часть профиля (точнее, заготов-

ки), обладающая высокой жесткостью, подлежит подгибке на значительный угол в условиях высвобождения, в то время как левая часть заготовки практически не меняет своего положения и к тому же отгибается вниз. Результатом может быть большая скрутка профиля, которая при воздействии на профиль со стороны правильного устройства может привести к раскрытию элемента двойной толщины и искажению конфигурации. Такое расположение профиля в роликах следует отнести к разряду мало удачных.

Расположение профиля на рис. 4.5-4 хотя и в большей степени, чем рассмотренные случаи, допускает двусторонний доступ роликов к заготовке, все же неприемлемо в связи с тремя недостатками: 1) большая глубина «врезания»; 2) несбалансированность продольных деформаций левой (весьма протяженной) и правой (сравнительно короткой) частей заготовки по развертке сечения червата последующей скруткой профиля; 3) разные уровни замыкания калибров вызвали бы дополнительные поводки профиля.

Расположение профиля на рис. 4.5-5 фактически дает возможность лишь односторонней подгибки полки с предварительно сформованным на первых переходах элементом жесткости. При этом замыкание калибров происходило бы на значительно дистанцированных уровнях, а процесс формообразования сопровождался бы искажением формы и размера профиля, поскольку формовка на последних переходах происходила бы без свободного двустороннего доступа инструмента. При этом потребовалось бы большее число технологических переходов, чем это было определено предварительно. Данное расположение профиля в роликах не может считаться оптимальным.

Аналогичными недостатками обладает и схема, приведенная на рис. 4.5-6. Однако здесь ситуация еще более осложняется тем, что глубина «врезания» в верхний ролик была бы больше, чем на рис. 4.5-5, и для большинства переходов формовка бы осуществлялась почти по закрытой схеме.

Наиболее благоприятными являются случаи расположения сечения профиля в роликах, приведенные на рис. 4.5-7 и 4.5-8, однако расположение сечения профиля в роликах на рис. 4.5-8 предпочтительнее. В этом случае подгибка практически всех элементов происходит вверх или с сохранением знака приращения угла подгибки. Этим устраняется встречное движение формирующих элементов верхнего ролика при подгибке элементов, хотя и существует различие в уровнях замыкания роликов.

Сделаем замечание относительно числа переходов для различного расположения профиля в роликах. Рассмотренные схемы рис. 4.5-1, ..., 4.5-7, в принципе, могут быть реализованы при ряде дополнительных условий, основное из которых – увеличенное число переходов. Представляется реалистичной реализация процесса формовки данного профиля и по другим схемам за 12 – 18 переходов, однако для некоторых случаев (рис. 4.5-2, 4.5-4, 4.5-6) потребовалось бы к тому же и увеличение диаметров формующих роликов. Здесь не рассматривается вопрос потери устойчивости периферийных элементов из двух соображений: во-первых, подгибаемые полки несут элементы жесткости, повышающие их устойчивость; во-вторых, сравнительно большая толщина заготовки при заданных размерах полок позволяет не уделять пристального внимания данному вопросу.

На рис. 4.6 представлена линейная и розеточная схема формообразования профиля дверного обрамления, учитывающая изложенные выше особенности, а на рис. 4.7 – профиль, изготовленный по этой схеме формообразования.



Рис. 4.6. Расположение сечения профиля в роликовом калибре и схема формообразования

Рассмотренные варианты обладают определенной общностью с большинством полузакрытых профилей и позволяют сформулировать следующие рекомендации: 1. При выборе положения профиля в основных валках следует располагать профиль с обеспечением минимальной глубины вреза в валки. 2. Расположение окончательного сечения профиля в роликах следует выбирать так, чтобы обеспечивался двусторонний доступ инструмента к заготовке на возможно большем числе переходов. При этом концевые участки профиля должны быть примерно на одном и том же уровне. 3. Вертикальная плоскость, содержащая ось профилирования, должна делить заготовку примерно на рав-

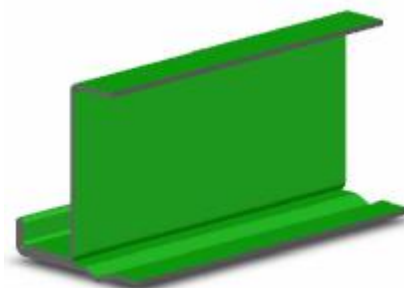


Рис. 4.7. Профиль, изготовленный по схеме рис. 4.6

ные части. 4. Следует отдавать предпочтение параллельной схеме формовки. 5. Схема формообразования должна гарантировать равенство продольных деформаций подгибаемых полок и точность формовки элементов профиля. 6. Формообразование срединных элементов двойной толщины следует осуществлять равномерно по переходам с одновременной подгибкой полок. 7. Если периферийные элементы двойной толщины имеют высоту, соизмеримую с подгибаемыми полками, то их формовку следует производить преимущественно на первых переходах, а подгибку полок – на последних. 8. Для гладких подгибаемых полок большой ширины следует предусмотреть меры предотвращения потери устойчивости, в то время как подгибаемые полки, несущие элементы двойной толщины, могут обладать достаточной собственной жесткостью. 9. Целесообразно располагать профиль в валках таким образом, чтобы по выходу из последней пары формирующих валков он имел минимальные поводки.

4.3. Выбор базового элемента и оси профилирования

Ось профилирования – геометрическое место лежащих на одной прямой точек исходной заготовки, равноудаленных от концевых точек содержащего их элемента профиля (рис. 4.8). Как правило, ось профилирования параллельна установочной базе профилировочного станка или составляет с ней небольшой угол в вертикальной плоскости. Участок профиля, подверженный наименьшему смещению в вертикальной плоскости при формообразовании и расположенный преимущественно параллельно осям валов, через который проходит ось профилирования, называется базовым элементом профиля (рис. 4.8-б). Определение базового элемента схемы формообразования предпочтительнее, чем выбор только оси профилирования. Это обусловлено тем, что основной участок профиля как бы фиксирует часть заготовки в роликах всех переходов, относительно которой осуществляется подгибка других элементов. Отметим, что базовый элемент (без учета его толщины) условно можно считать отрезком прямой (см. рис. 3.32-4, 4.6, 4-8-а). При выборе оси профилирования руководствуются следующим:

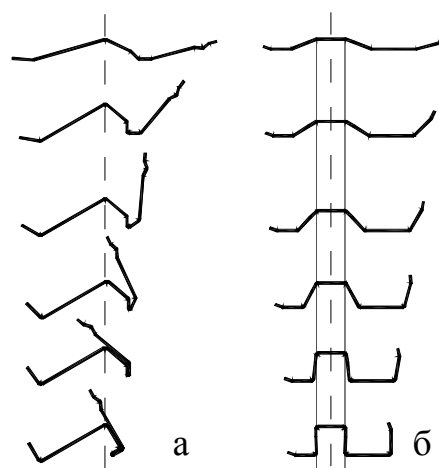


Рис. 4.8. Расположение оси профилирования и базового элемента профиля (ограничен сплошными тонкими линиями)

- ось профилирования должна представлять собой прямую линию (при изготовлении профилей без заданной продольной кривизны);
- ось профилирования должна делить ширину заготовки примерно пополам, а жесткости подгибаемых элементов по обе стороны от нее должны быть по возможности равными;
- желательно (но не обязательно), чтобы основная ось профиля проходила через участок профиля, параллельный осям основных валов (рис. 4.8-б).

Положение базового элемента и оси профилирования для некоторых типоразмеров полузакрытых профилей показано на рис. 3.32.

4.4. Разработка схемы формообразования

Разработка схем формообразования включает в себя ряд уже рассмотренных компонент, для которых в соответствующих разделах книги выданы надлежащие рекомендации. На рис. 3.32 приведены схемы формообразования для девяти полузакрытых профилей, построенные с учетом расположения профиля в формующих валках, принципа и последовательности формовки, условий назначения углов подгибки, глубины врезания профиля в калибр. В этом отношении наиболее показательной является схема формообразования профиля обрамления двери (рис. 4.5 и 4.6) [52]. Выбранное положение профиля в валках обеспечивает почти равномерную глубину врезания профиля в калибр и лишь на четвертом и пятом переходах глубина врезания профиля несколько превышает ту же величину на последнем переходе. Углы подгибки, как указано в разделах 2 и 3, назначают из условий отсутствия потери устойчивости элементов и их переформовки, по возможности, с учетом принципа преемственности. Для новых схем формообразования приходится проводить более тщательный анализ перемещений точек элементов. На рис. 4.9 приведены графики горизонтальных и вертикальных перемещений периферийных элементов жесткости (левого – «л» и правого – «п») для схемы формообразования рис. 4.6 с учетом выбранных углов подгибки. Отметим, что к окончанию формообразования концевые элементы находятся на одном и том же уровне. В этом смысле схема формообразования несколько напоминает схему формообразования неравнополочного уголка, что позволяет выстроить ее оптимальным образом, без значительной подгибки полки, несущей элемент двойной толщины. Здесь ось профилирования делит заготовку примерно пополам, а монотонная подгибка по углу крайних полок с элементами жесткости доставляет им примерно равные про-

дольные деформации в каждом из переходов, несколько уменьшающиеся за осевой плоскостью роликов вследствие эффекта «жесткого конца», регулируемого соотношением диаметров роликов соседних переходов [52]. Приблизженность разработанной схемы к схеме открытой формовки с монотонным характером подгибки по углу практически всех элементов хорошо видна на «розеточной схеме» (“flower diagram” в американской терминологии) рис. 4.6.



Рис. 4.9. Перемещения точек периферийных элементов

Использование параллельной формовки в схеме формообразования профиля типа «сайдинг» хорошо видно на рис. 4.10. Другие схемы формообразования приведены в разделе 3: рис. 3.1 – несимметричного профиля; рис. 3.9 – профиля с ЭДТ; рис. 3.20 – С-образного профиля; рис. 3.23 – профилей с одиночным рифтом в донной части; рис. 3.27, 3.31 – профилей с комбинированными рифтами.

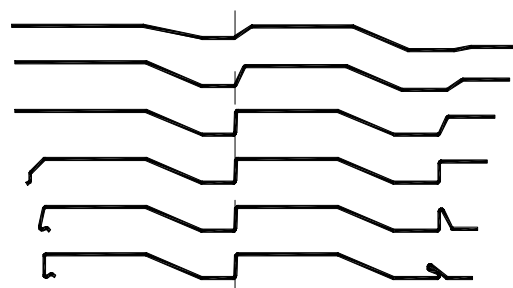


Рис. 4.10. Схема формообразования профиля типа «сайдинг»

4.5. Обеспечение размерной точности полузакрытых профилей

При разработке технологии производства полузакрытых профилей следует обеспечивать размерную точность сечения профиля по угловым и линейным характеристикам.

Угловые характеристики. В отсутствие подсадки пружинение учитывают по хорошо известной формуле [38] и в схеме формообразования предусматривают перегиб (поднутрение) на расчетный угол (см. рис. 3.20, 3.23, 3.31, 3.32-3,-7,-8). При подсадке полки следует учитывать величину пружинения по графику рис. 3.18. В многоэлементных профилях меры по устранению пружинения следует предусматривать для каждого из элементов, что отражается на схеме

формообразования в переходах окончательной формовки элемента. В редких случаях удастся компенсировать пружинение нескольких угловых зон введением калибровочного перехода.

Линейные характеристики. Из-за износа роликовой оснастки в процессе эксплуатации линейные размеры поперечного сечения профиля выходят за пределы поля допуска по чертежу. Даже для новой технологической оснастки характерно увеличение линейного размера элемента профиля L по чертежу на величину ΔL из-за упругой отдачи прилегающей угловой зоны. Поэтому изменение линейного размера учитывают на основе формулы:

$$\Delta L = \frac{3 \cdot k \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r + 1/2)^2}{1 + 6 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r + 1/2)} \cdot s, \quad (4.3)$$

где k – коэффициент, определенный в работе [19]; σ_T , E – предел текучести и модуль Юнга материала соответственно, МПа; r , – внутренний относительный радиус зоны изгиба; s – толщина заготовки, мм.

При проектировании формующих валков надлежит учитывать изменение линейных размеров элементов профиля по отношению к калибру валков на основе формулы (4.3). Размеры калибра следует назначать по нижнему пределу поля допуска (рис. 4.11), что позволит выдержать заданные размеры и существенно увеличить срок службы формующих валков.

4.6. Уточнение числа переходов и выбор оборудования [161, 63]

Иногда при разработке схемы формообразования возникает необходимость увеличения или сокращения первоначально определенного числа переходов. Поэтому перед выбором оборудования уточняют число переходов (см. ветвления в алгоритме рис. 4.1), а при разработке схемы формообразования под имеющееся оборудование с ограниченными возможностями предусматривают ряд дополнительных мер (изме-

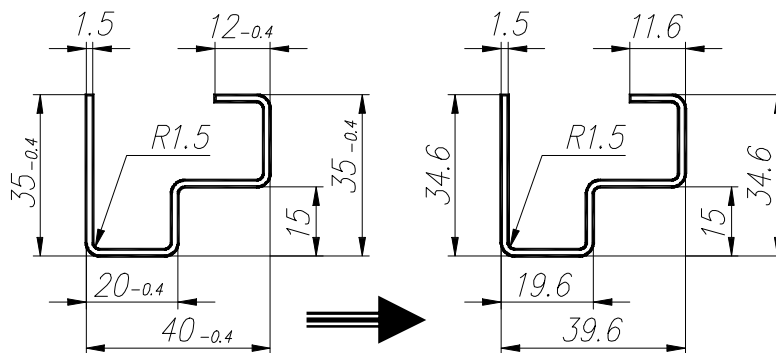


Рис. 4.11. Назначение размеров роликового калибра:
а) чертеж профиля; б) чертеж роликового калибра

нение диаметров формирующих роликов, межклетьевые проводки и т.д.) [27].

Выбор профилировочного оборудования *для вновь создаваемого производства* представляет определенные сложности из-за большого разнообразия такого оборудования (несколько сот модификаций [161]). Известные нам виды станков были классифицированы по 24 параметрам (табл. 4.1) и дано описание их конструктивных особенностей и технологических возможностей [161]. Классификатор профилировочных станков представлен на рис. 4.12. При выборе нового оборудования, учитывая динамичность и тенденции рынка профильной продукции, можно рекомендовать следующее:

1. Оборудование следует выбирать универсальное, средней производительности (15 – 30 м/мин) – с ростом производительности увеличивается число клеток, габариты и его стоимость. Ликвидность универсального оборудования выше, чем специализированного. Из соображений диверсификации профильной продукции предпочтительнее приобрести две линии средней производительности, чем одну высокопроизводительную.

2. Профилировочное оборудование следует приобретать только у разработчиков технологии в составе линий со сдачей «под ключ». Мнимая выгода от приобретения «в розницу» почти всегда оборачивается убытками «оптом». К тому же цена автоматизированных линий «под ключ» едва превышает 3 – 4 млн. руб. в ценах 2008 года.

3. Предпочтительными являются станки, характеризующиеся следующим: модульный принцип построения; обычный или комбинированный тип по уровню совмещения операций; одна рабочая зона; стационарный станок с электроприводом (с тиристорной схемой управления на пуск); с фиксированным межклетьевым расстоянием; с несъемными клетями или с кассетной (съемной) компоновкой клеток; с карданным приводом и регулируемыми горизонтальными рабочими валами с опорами на подшипниках качения и замыканием валов откидными серьями с возможностью регулировки.

Окупаемость оборудования обычно не превышает одного года. Известны случаи, когда производство эксклюзивных профилей на одной линии производительностью 10 м/мин в одну смену приносило ежемесячную прибыль в 1 млн. руб. в ценах 2006 года [161].

Рассмотрим специфику выбора одного из станков разработки ООО «НПО «ИДМ» для изготовления профиля обрамления дверей (рис. 4.7) по разработанной схеме рис. 4.6 [63].

Параметры классификации профилировочных станков

№	Параметр классификации	Структурный уровень	Примечание
1.	Энерговооруженность и габариты	Конструкция в целом	
2.	Универсальность		
3.	Тип оснастки		
4.	Способ настройки оснастки		
5.	Модульность		
6.	Уровень совмещения операций		
7.	Количество рабочих зон		
8.	Направление движения заготовки		При двух зонах
9.	Характер привязки к месту эксплуатации		
10.	Особенность монтажа		
11.	Тип привода		
12.	Скоростной режим		
13.	Способ регулировки скорости вращения рабочих валов		Для регулируемого привода
14.	Характер изменения межклетьевого расстояния		
15.	Тип привода клеток		
16.	Характер раздачи движения на валы		
17.	Регулировка межосевого расстояния		
18.	Вид крепления клеток	Клеть	
19.	Тип фиксации клеток		
20.	Пространственное расположение валов клеток		
21.	Уровень совмещения переходов		
22.	Конструктивная реализация клеток		
23.	Вид замыкания консольных валов		
24.	Тип опор рабочих валов клеток		

Упомянутое предприятие производит профилировочные восьмиклетьевые станки «среднего типа» двух видов: с зубчатым и карданным приводом клеток. Оба станка обладают достаточной мощностью, приемлемой длиной валов, подходящим межосевым и межклетьевым расстоянием, однако выбор следует сделать в пользу станка с карданным приводом клеток.

Дело заключается в том, что замыкание роликовых калибров для ряда переходов выполнено на разных уровнях для левой и правой части профиля. Это приводит к различию скоростного режима различных формующих элементов инструмента. Относительного выравнивания линейных скоростей рабочих участков нижнего и верхнего роликов можно добиться отключением привода некоторых валов. Очевидно, возможность отключения отдельных валов имеется только у станка с карданным приводом, чем и определился его выбор.

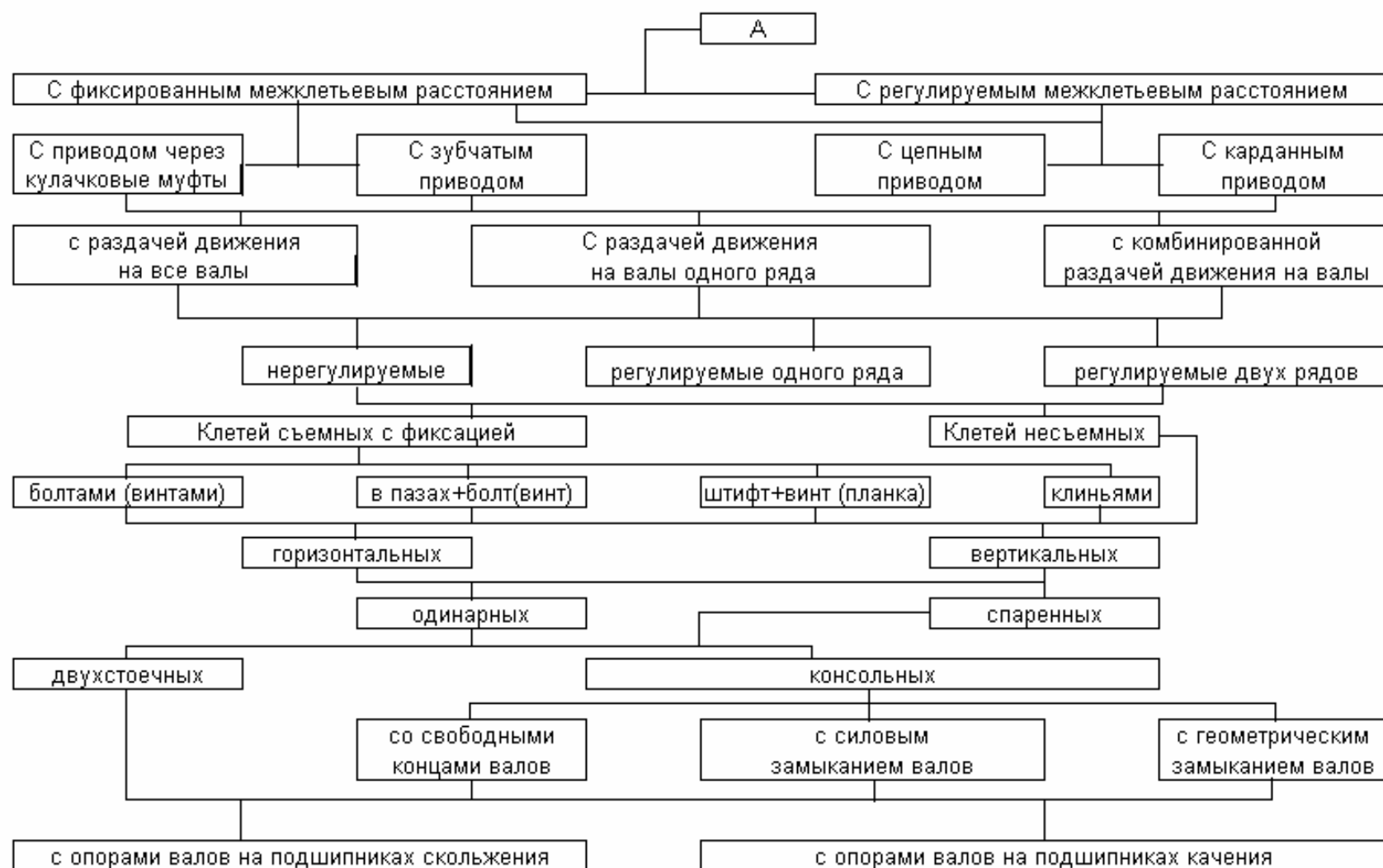


Рис. 4.12. Классификатор профилировочных станков

Более подробно вопросы выбора профилировочного оборудования и обзор современного состояния в этой области изложены в работах [161, 63].

4.7. Особенности формовки периферийных ЭДТ [162]

Среди множества типов ЭДТ наиболее распространенными являются периферийные ЭДТ (рис. 4.13), формообразование которых вызывает определенные сложности из-за ограниченного числа переходов при интенсивном деформировании. Рис. 4.13 показывает, что в конечном положении ЭДТ располагаются различным образом по отношению к базовому элементу: в схемах **б**, **в**, **г**, **д**, **е** – горизонтально, в схеме **б** – вертикально, в схеме **а** – под углом.

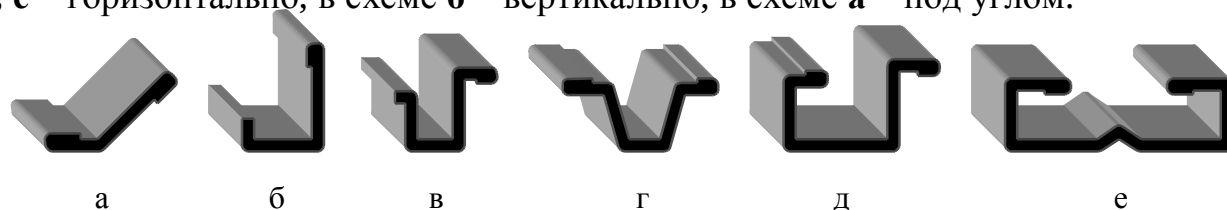


Рис. 4.13. Некоторые виды профилей с ЭДТ

Кроме того, сам периферийный элемент может быть обращен вниз или вверх (ср. периферийные ЭДТ схемы д на рис. 4.13). Более того, наличие ЭДТ на профиле может коренным образом изменить и схему формообразования, пригодную для изготовления профиля аналогичной конфигурации, но без ЭДТ. На рис. 4.14 показана последовательность формовки ЭДТ при его нижнем и верхнем расположении по отношению к несущей полке. В первом случае формовка может осуществляться по открытой схеме, а во втором – только по закрытой. При формовке ЭДТ три обстоятельства осложняют технологию: 1) наличие покрытия (значительные деформации при гибке на 180°); 2) невозможность подсадки для устранения пружинения; 3) необходимость учета характеристик жесткости при формовке ЭДТ. Не-

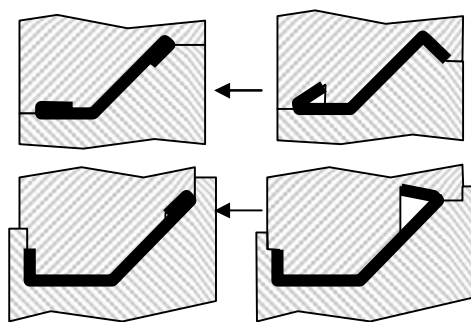


Рис. 4.14. Последовательность формовки ЭДТ при МИД

которые технические решения при формовке ЭДТ изложены в работе [4]. Что касается пружинения, то как видно на рис. 4.15, в верхней точке зоны изгиба имеет место практически точечный контакт заготовки с верхним роликом. Это приводит к значительным контактным напряжениям и нарушению покрытия. Поэтому для профилей с ЭДТ подсадка крайне нежелательна. В целом, при параллельной формовке профилей с ЭДТ надлежит

придерживаться определенных правил. Во-первых, калибровку валков надлежит проводить с уточненным расчетом калибров во избежание раскатки торца ЭДТ и потери устойчивости заготовки; во-вторых, для каждого из переходов выравнивать локальные жесткости левой и правой частей заготовки для предотвращения скрутки профиля; в-третьих, окончательную формовку ЭДТ следует завершать к достижению несущей полкой угла подгибки 45 – 60 градусов.

Равенства локальных жесткостей отчасти можно добиться различием углов подгибки полок. Если выравнивание локальных жесткостей при положительных приращениях углов оказывается невозможным, прибегают к назначению отрицательных углов приращения. Это означает чередование процессов подгибки и разгибки полок, что негативно сказывается на сохранности покрытия в зонах изгиба. Если добиться удовлетворительного результата различием углов подгибки полок не удастся, то придется прибегать к повороту базового элемента или же всего сечения профиля относительно оси профилирования [27].

Одновременная подгибка полок и формовка ЭДТ по преимуществу должны вестись на первых переходах, однако в случае сложных несимметричных профилей формовка ЭДТ может начинаться с одного из промежуточных переходов, а заканчиваться к окончательному переходу. Однако в этом случае приходится применять специальные проводящие устройства и окончательную формовку ЭДТ производить в холостых вспомогательных калибрах с вертикальным или наклонным расположением несущих осей роликов. При этом усложняется процесс настройки режимов и требуется дополнительное технологическое оснащение.

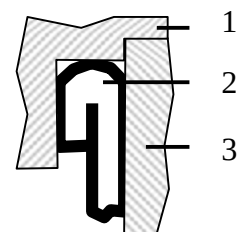


Рис. 4.15. Подсадка заготовки в роликах:
1 – верхний ролик;
2 – заготовка;
3 – нижний ролик

4.8. Проектирование и изготовление технологического оснащения

Технологическое оснащение для изготовления полузакрытых профилей включает: 1) оснастку для раскроя рулонов и обесечки скосов заготовок; 2) оснастку перфорирующую; 3) оснастку для формообразования (формующие и правильные ролики, втулки дистанционные, крепежные элементы, межклетьевые проводки); 4) оснастку отрезную. Подходы к проектированию и изготовлению оснастки для вспомогательных операций «1)», «2)», «4)» изложены в моногра-

фиях [4, 19, 27]. Рассмотрим более подробно проектирование и изготовление основного технологического оснащения – формующих роликов.

Проектирование формующих роликов [52, 157, 154] базируется на выбранной схеме формообразования в нисходящем порядке номеров переходов с учетом требований функциональности, эргономичности (удобства монтажа и настройки), экономичности (сборная оснастка, возможность переточки) и технологичности изготовления. Переход от схемы формообразования проектированию роликовой оснастки покажем на примере схемы рис. 4.6. На рис. 4. 16 показан эскизный вариант роликовой оснастки для изготовления профиля обрамления двери. Верхние ролики четырех последних переходов выполнены сборными ввиду сложности обработки некоторых рабочих участков. Особое внимание следует обратить на условия замыкания калибров [154]. Укажем лишь, что для рассматриваемого профиля применяется замыкание по горизонтальным и вертикальным линиям разреза с двусторонним «врезанием» и геометрическим замыканием валов. Более тонкие вопросы замыкания калибров и назначения параметров буртов для профилей типовой номенклатуры и различных видов покрытий материала заготовок рассмотрены в работах [4, 27] Назначение других параметров оснастки осуществляется на основе табл. 4.2.

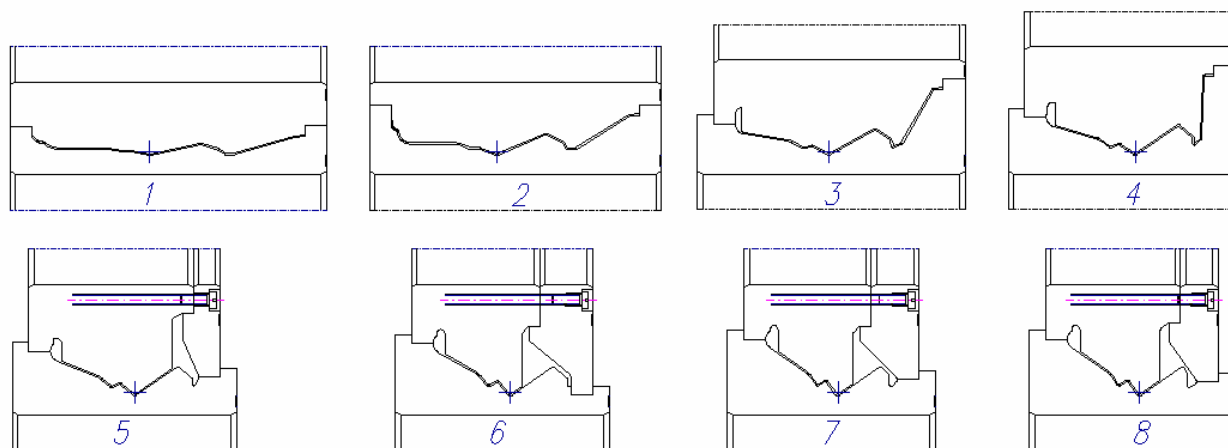


Рис. 4.16. Эскизный вариант формующих роликов

Ниже дается пример, иллюстрирующий применение принципа преемственности при изготовлении Ш-образного профиля с ЭДТ и рифтом в донной части профиля (рис. 4.17) и базирования технологического оснащения при установке на рабочие валы профилирующей клетки станка (рис. 4.18) [63] с учетом рекомендаций табл. 4.2.

Таблица 4.2

Основные параметры и требования к формующей оснастке

№	Параметр, единица измерения	Значение параметра / назначение
1.	Расположение профиля в роликах	Подгибаемыми полками вверх
2.	Рабочий калибр	Замкнутый по контуру для всех переходов
3.	Точность рабочего контура	7 квалитет допуска
4.	Твердость инструмента, HRC	58...62
5.	Посадка роликов на валы станка	H7/h7
6.	Скругление кромок, мм	$R = 0,3 \div 0,5$
7.	Фаски посадочных отверстий, ммхград.	5×30° (облегчение обработки и посадки на валы)
8.	Чистота обработки рабочего контура и посадочных поверхностей роликов, мкм	0,4
9.	Чистота обработки других поверхностей, мкм	0,8
10.	Диаметры формующих роликов, мм	90...200 (учет глубины вреза, межосевого расстояния, диаметра рабочих валов)
11.	Изменение диаметров формующих роликов от перехода к переходу (обеспечение натяга кромки)	На (0,5÷1,0) % для материалов толщиной от 0,5 до 1мм и на 0,5% для материалов толщиной от 1 до 2 мм
12.	Минимальная толщина стенки ролика в радиальном направлении, мм	10
13.	Унификация формы и размеров вспомогательных элементов	В пределах комплекта
14.	Простановка размеров рабочего контура	Комбинированный метод (от технологических баз)
15.	Межцентровое расстояние	Одинаковое во всех переходах
16.	Положение базового элемента схемы (исключая № 11 таблицы)	На неизменном расстоянии от баз станка на всех переходах
17.	Ширина роликов	Различная по переходам
18.	Аксиальное базирование нижних роликов	По торцевым базам валов (использование втулок)
19.	Аксиальное базирование верхних роликов	По посадочным поверхностям нижних роликов
20.	Обеспечение радиального зазора	Базирование верхнего ролика по нижнему через поверхности
21.	Обеспечение боковых зазоров	Взаимное базирование нижнего и верхнего роликов по кольцевым поверхностям (посадка H7/h7) буртов

№	Параметр, единица измерения	Значение параметра / назначение
		или уступов
22.	Толщина буртов, мм	15...25
23.	Скругление кромок буртов по радиусу, мм	3 (не менее)
24.	Перекрытие буртов (мин.), мм	4...6
25.	Условия применения сборных роликов	Трудность доступа для обработки рабочей поверхности ролика
		Изготовление гаммы однотипных профилей различной ширины
		Частая замена быстроизнашивающейся рабочей части ролика
26.	Марка материала роликов	9ХС, 9Х1, ШХ15, ХВГ
27.	Маркировка роликов	По торцам

Клеть (рис. 4.18-а) представляет собой основание 1, в котором установлены стойки 2 с перемещающимися по ним ползунами 3. В ползунах 3 на подшипниках качения установлены рабочие валы 4 и 6. Перемещение нижнего ползуна в вертикальной плоскости осуществляется вращением винта 5. Перемещение верхнего ползуна в вертикальной плоскости осуществляется вращением винта 7. Крутящий момент рабочим валам передается от раздаточной коробки через карданные валы к рабочим валам, на которых при помощи замыкающей опоры закреплены ролики.

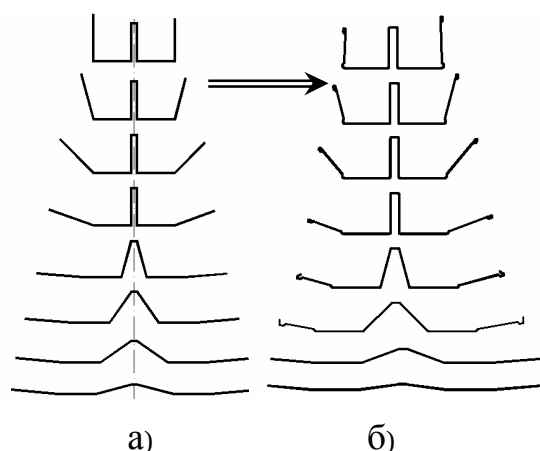


Рис. 4.17. Схемы формообразования Ш-образных профилей: а – без периферийных элементов жесткости; б – с периферийными элементами жесткости

Схема базирования формующих роликов приведена на рис. 4.18-б. 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.

В данном случае применяется сборная оснастка с учетом п. 25 табл. 4.2, а также вспомогательный инструмент – межклетьевая проводка (рис. 4.19). Рис. 4.20 иллюстрирует назначение параметров сборной оснастки в соответствии с табл. 4.2.

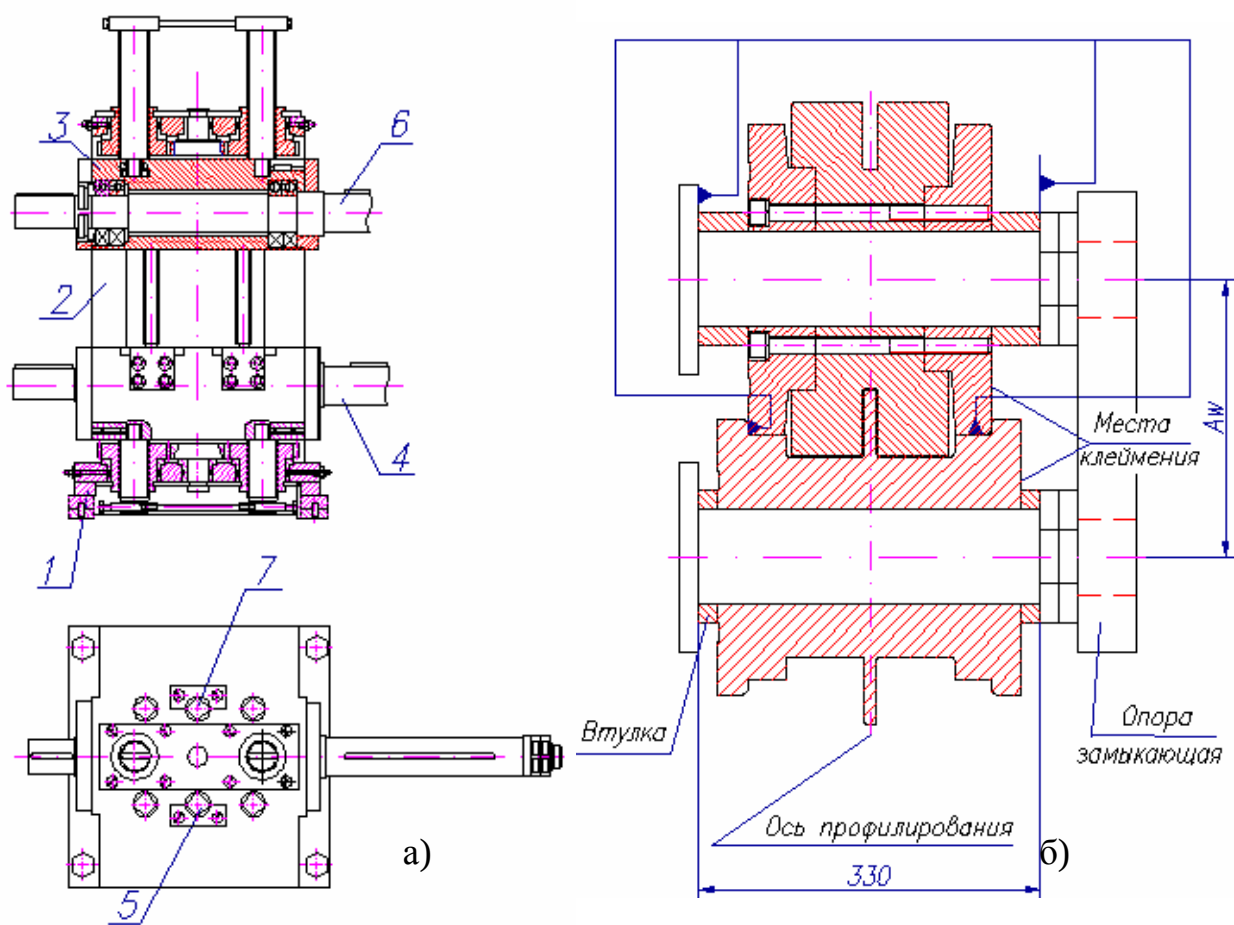


Рис. 4.18. Клеть профилегибочного стана: а – устройство клетки и органы регулировки; б – схема базирования формирующей оснастки на рабочих валах клетки

При необходимости, в роликовой оснастке предусматривают зоны высвобождения под рифты, ЭДТ, а также при поднутрении подгибаемой полки с целью компенсации пружинения (рис. 4.21). Размеры обычно назначают конструктивно (рис. 4.21,а,б) или на основе расчетов (рис. 4.21,в).

Изготовление формирующих роликов осуществляется в следующей последовательности [4]: 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

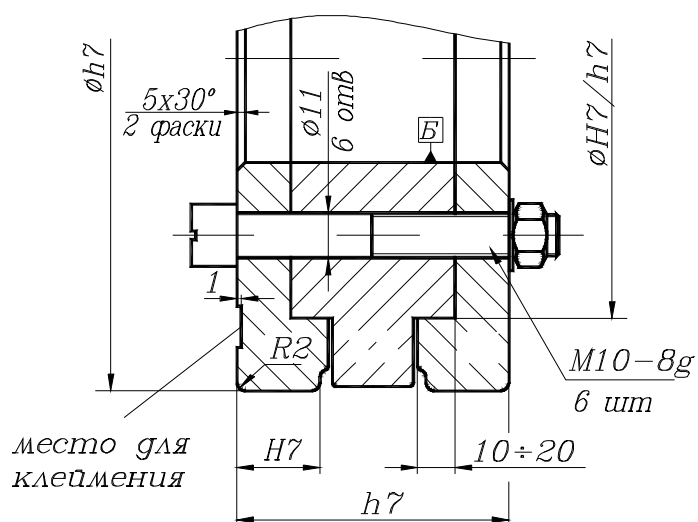


Рис. 4.20. Конструкция сборного ролика

16K20); 3. Черновая токарная обработка (рис. 4.22-а) по рабочему контуру с припуском 0,5 мм на линейные размеры и 0,5 – 1 мм на диаметральные; труднодоступные места обрабатываются без припусков в чистовой размер (универсальный токарный станок типа 16K20); 4. Сверлильные, долбежные и другие слесарные операции; 5. Термическая обработка до твердости поверхности ролика 58..62 HRC; 6. Шлифовка посадочного отверстия под вал (внутришлифовальный станок) и шлифовка торцев ролика (плоскошлифовальный станок); 7. Чистовая обработка (рис. 4.22-б) наружного контура в центрах на токарных станках (станок типа 16K20, индикаторная стойка, эльборовый режущий инструмент); 8. Полировка рабочего контура (полировочный станок, наждачная бумага различной зернистости, паста ГОИ, войлок).

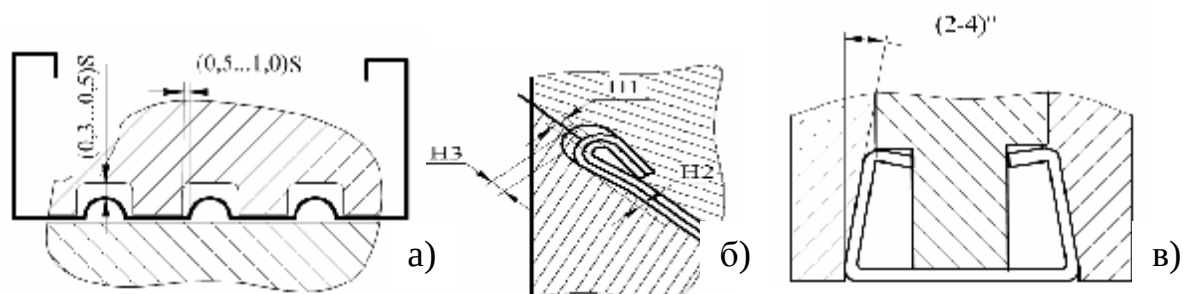


Рис. 4.21. Зоны высвобождения в роликовой оснастке: а – рифтов; б- ЭДТ; в – отбортовок

При изготовлении инструмента размеры рабочего контура роликов всех переходов контролируются согласно чертежу. На рис. 4.22,в,г показаны комплекты роликовой оснастки, смонтированные на оборудовании НПО «ИДМ».



Рис. 4.22. Роликовая оснастка: а – черновая токарная обработка ролика; б – чистовая обработка ролика; в – комплект роликов для изготовления профиля обрамления дверей; г – оснастка для изготовления профиля типа «сайдинг» в сменных кассетах

Изготовленное технологическое оснащение (основное и вспомогательное) используется для отработки технологии и получения пилотных партий кондиционных профилей на предприятии-разработчике перед поставкой технологии.

4.9. Отработка технологии производства полузакрытых профилей

Отработка технологии изготовления МИД полузакрытых профилей производится в соответствии с технологической картой табл. 4.3 [27] и требует достаточно высокой квалификации исполнителя. В компаниях-разработчиках данные виды работ производятся под руководством инженера-технолога, разработавшего чертежи технологического оснащения. Издержки технологии, связанные с несовершенством моделей и расчетных процедур, устраняются на этой стадии создания технологии. В последние годы все чаще приходится иметь дело с эксклюзивными профилями, не имеющими аналогов. Поэтому выявление причин дефектов профилей, учет особенностей отработки, режимы профилирования регистрируются в журналах технологической отработки. Анализ схем формообразования, результатов отработки и их последующее использование при создании технологии производства профилей аналогичных типов-размеров позволяет существенно сократить затраты на ее освоение. Отметим, что для многоэлементных профилей стоимость одного комплекта технологической оснастки может достигать 500 тыс. руб. в ценах 2007 г. Отсюда следует, что исследование, установление закономерностей формообразования, формализация процедуры проектирования технологии позволяют на 15 – 20 % уменьшить затраты на освоение технологии.

В качестве примера рассмотрим отработку технологии производства детали «шинорейка» (рис. 4.23) размером 20x27x8,5x0,7 мм для электротехнической промышленности [163].

В схеме формообразования (рис. 4.23) в качестве базового элемента берется донная часть профиля, а подгибка элементов осуществляется сбалансированно с обеих сторон. Основным критерием сбалансированной подгибки элементов является, как правило, протяженность ЗПП. Схема также показывает, что, начиная с седьмого перехода, формовка профиля осуществляется по схеме, характерной для полузакрытых профилей с односторонним доступом инструмента к заготовке, поэтому формовка ряда элементов происходит по схеме изгиба консольной балки. При этом зоны изгиба могут формоваться произвольно, что приводит к потере устойчивости заготовки. С целью предотвращения произвольной формовки угловых зон на первом переходе формируются технологические рифты [152] по местам будущих зон изгиба, которые впоследствии преобразуются в угловые зоны. Технологические рифты повышают жесткость заготовки на промежуточных переходах и более четко позиционируют зоны изгиба.

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 формующих роликов. Станки семейства ГПС или СПУ
2.	Выставить направляющее устройство в горизонтальном и вертикальном направлениях по оси профилирования и установить его планки на ширину заготовки		Станки семейства ГПС или СПУ
3.	В обойму правильного устройства вставить ролики		Комплект правильных роликов
4. 5.	Подать заготовку через направляющее устройство в ролики клетки предварительного формообразования	Ширина заготовки: $B \pm 0.2 \text{ мм}$	Станки семейства ГПС или СПУ
6.	Произвести формообразование в роликах профилирующих клеток		Комплект формующих роликов. Станки семейства ГПС или СПУ
7.	Произвести контрольные замеры		Плита поверочная, универсальная индикаторная стойка, угломер, штангенциркуль

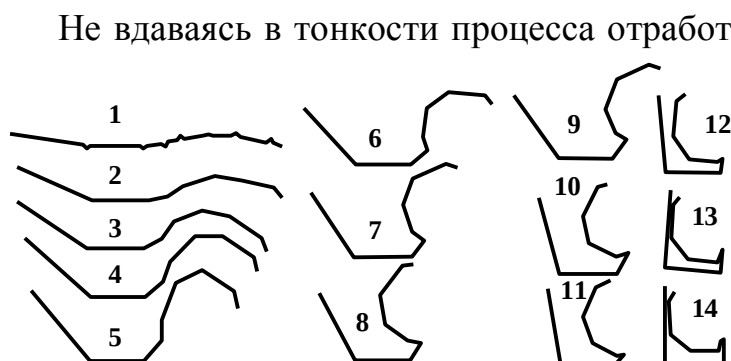


Рис. 4.23. Схема формообразования гнутого полузамкнутого профиля типа «шинорейка»

Не вдаваясь в тонкости процесса отработки из соображений ноу-хау, перечислим проведенные авторами мероприятия, связанные с отработкой технологии, реализуемой на основании схемы формообразования рис. 4.23: 1. Были проточены верхние ролики 10 – 14 переходов в зоне формовки

элемента двойной толщины на 0,4 мм для предотвращения излома ЭДТ; 2. Из-

за недоформовки профиля вместо роликов 7– 9 переходов (с боковыми роликами) были использованы роликовые пары с закрытым контуром; 3. Роликовые пары 7 – 13 переходов были разведены на 0,35 мм в связи с переформовкой ЭДТ; 4. Для устранения потери устойчивости полки с размером 27 мм были предложены межклетьевые проводки в виде вертикальных роликов на переходах 11– 12 и 12 – 13; 5. Для получения внутреннего зазора, согласно чертежу изделия, между горизонтальными полками профиля верхние ролики 10 – 14 переходов были проточены на 1 мм на диаметр в зоне формовки горизонтальной полки; 6. Для устранения смятия полки с габаритом 3,5 мм были проточены верхние ролики переходов 12 – 14 в зоне воздействия на торец полки на 2 мм на диаметр; 7. Для предотвращения скрутки в 13-ом переходе предусмотрен поворот сечения на небольшой угол.

На рис. 4.24 приведены три вида полузакрытых профилей типа «шинорейка», в создании технологии которых автор принимал участие. Автором была спроектирована большая часть технологического оснащения, произведена его отработка, получены опытные партии профилей и осуществлено внедрение технологии и оборудования на площадях заказчика.

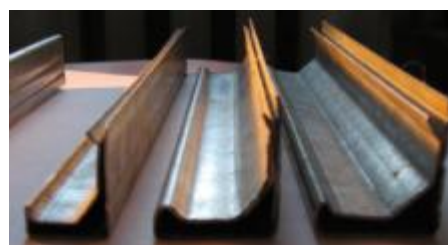


Рис. 4.24. Изготовленные МИД полузакрытые профили типа «шинорейка»

Таким образом, возможности МИД и изложенные процедуры отработки технологии требуют более тщательных процедур проектирования, основанных на расчетах пластического формоизменения заготовки, экспериментальных данных и их обобщении на достаточно широкий класс полузакрытых профилей. Именно это и было сделано авторами и представлено в данной книге.

4.10. Внедрение оборудования и технологии

Результаты проведенных авторами исследований внедрены на ряде предприятий РФ в форме реализации соответствующих технологий МИД на автоматических линиях профилирования [63] (рис. 4.25, 4.26).

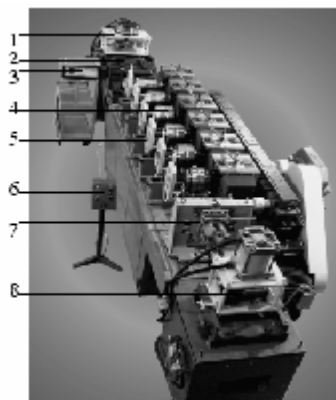


Рис. 4.25. Автоматизированная линия на базе станка ГПС-300М6: 1 – перфоратор; 2 – направляющее устройство; 3 – отсчитывающее устройство; 4 – формующий ролик верхний; 5 – серьга замыкающая; 6 – пульт управления; 7 – правильное устройство; 8 – летучий штамп

Оборудование. Авторы принимали участие в разработке технологического оборудования: профилегибочного стана (патент № 50886 на полезную модель [64], рис. 4.26, поз. 2), правильного устройства для правки профилей, монтируемого на стан (заявка на изобретение № 2007136511 от 02.10.2007 г., рис. 4.27) [164], пресса пневматического для разделительных операций (патент № 49744 на полезную модель [165], рис. 4.28), а также устройства для испытания покрытия (патент № 37221 на полезную модель [166], рис. 4.29).

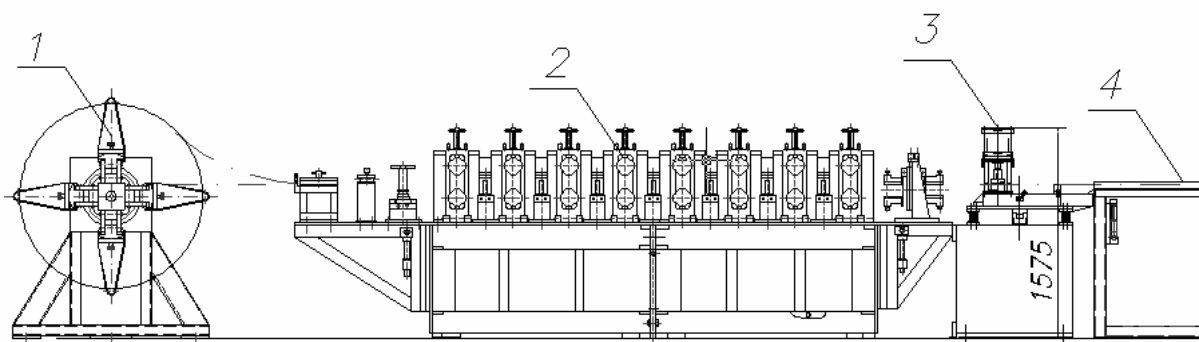


Рис. 4.26. Автоматическая линия на базе станка СПУ-400К8х65: 1 – рулонница; 2 – станок СПУ; 3 – отрезной пневматический пресс; 4 – стол приемный

Универсальный профилегибочный стан [64] СПУ-400К8х65 предназначен для изготовления МИД в роликах мелкосортного гнутого профиля и состоит из двух секций с четырьмя профилирующими клетями каждая, направляющего устройства, правильного устройства и системы управления. Основными узлами стана являются профилирующие клетки, описание которых дано в разделе 4.8. Основные технические характеристики стана приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Технические характеристики станка СПУ-400К8х65

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

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.

Правильное устройство для правки профиля [164] является модификацией существующего варианта правильного устройства (рис. 4. 27-а) и предназна-



а)



б)

Рис. 4.27. Правильные устройства: а – устройства для обеспечения прямолинейности профиля; б – устройство для придания кривизны профилю

чено не только для правки, но и для придания, при необходимости, профилю продольной кривизны за счет поворота монтажной платформы (рис. 4.27-б).

Пресс пневматический [165] (рис. 4.28) предназначен для отрезки поступающего из стана профиля на заданную длину без остановки линии и состоит из станины с пневматическим прессом, ресивера, блока подготовки воздуха и пневмораспределителя. Характеристики прессы приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Технические характеристики прессы пневматического

Параметр, единица измерения	Значение
Максимальная ширина отрезаемой детали, мм	300
Максимальный ход поршня, мм	80
Максимальный ход каретки при работе, мм	120
Рабочее давление в пневмосистеме, МПа	0,4 – 0,6
Габаритные размеры прессы: длина, мм ширина, мм высота, мм	830 942 1450
Масса, кг	42

Профиль поступает из стана в матрицу, закрепленную в прессе, и по сигналу на отрезку воздух из ресивера поступает в верхнюю полость пневмоцилиндра, приводя в движение поршень с пуансоном (ножом). Сопутствующее движение каретке прессы вдоль направляющих передается профилем. По сигналу от электронного блока управления происходит возврат поршня в исходное положение за счет подачи воздуха в нижнюю полость пневмоцилиндра. Возврат подвижной каретки в первоначальное положение происходит под действием пружин. Отрезанный в размер профиль поступает на стол-сбрасыватель.



Рис. 4.28. Пресс пневматический для резки профиля на мерные длины

Устройство для испытания покрытия [166] (рис. 4.29) предназначено для экспресс-контроля свойств покрытия и состоит из сварного каркаса 1, к которому крепятся неподвижная пластина 2 с направляющими уголками 3 и направляющие планки 4. По направляющим уголкам 3 может перемещаться в вертикальном направлении пластина 5, на которой закреплена оправка 6 с шаровым индентором 7. Прижим индентора к испытуемой заготовке с покрытием 8 обеспечивает пружина 9 по шпильке 10 гайкой 11. Величину сжатия пружины отмечают по индикаторной головке 12, которая связана с гайкой 11 посредством шайбы 13. Заготовка с покрытием крепится на подвижной пластине 14, которая имеет возможность перемещаться в горизонтальном направлении посредством рукоятки 15 по направляющим планкам 4.

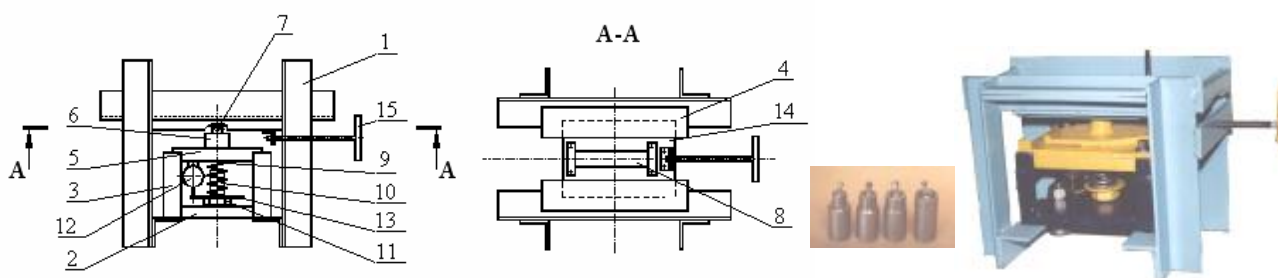


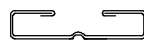
Рис. 4.29. Устройство для испытания покрытия: схема общего вида (слева), фотографии инденторов и устройства в металле (справа)

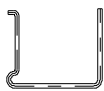
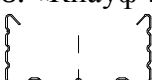
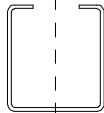
Устройство для испытания покрытия эксплуатируется в ОАО «Ульяновский НИАТ», а тремя другими устройствами (стан, правильное устройство, пресс пневматический) комплектуются автоматизированные линии в НПО «ИДМ» для поставки заказчикам (в 2008 году поставлено более 10 линий).

Технология. Результаты проведенных исследований позволили создать технологии производства полузакрытых профилей, которые внедрены в производство на ряде российских предприятий. Объем внедрения и участие авторов приводятся в табл. 4.6. Профили, на базе которых производились исследования, внедрены в строительстве, производстве мебели, электротехнической промышленности и автомобилестроении. Так, С-образные профили с рифтами и ЭДТ («прогон») применяются для бокового крепления пластиковых панелей в ванных комнатах, Ш-образный и профиль с серединными и периферийными ЭДТ применяются в качестве верхнего и нижнего треков шкафов-купе, С-образные профили применяются для легкосборного строительства, в качестве усилителей ПВХ-окон, элементов раздвижных ворот, профили системы «Кнауф» служат для крепления гипсокартона, подвесных потолков, Н-образный профиль – для стыковки листов гипсокартона, L-образный и F-образный профили применяются для торцевой облицовки и угловой стыковки листов гипсокартона соответственно, «сайдинги» и «автофальцы» используются при облицовке зданий и кровле крыш, «шинорейки» и короба служат элементами монтажных систем воздуходува и электропроводки, профили с элементами жесткости применяются для производства автофургонов.

Таблица 4.6

Внедрение технологии производства МИД полузакрытых профилей

Условное наименование, конфигурация, размеры сечения профиля, материал	Объем внедрения	Участие авторов	Предприятие-заказчик (название, город)	Акт / эффект (тыс. руб.)
1. «Прожилина»  85x25x1 мм, 12X18H10T	1 к-т оснастки	- отработка технологии - внедрение в производство	«ВИП Ижиниринг», г. Малоярославец	Акт без эффекта
2. «Стойка»  37x7x12x3,7x0,8 мм ОЦ 08ю	1 к-т оснастки	- разработка схем - отработка технологии	«Омега Хаус», г. Москва	–
3. «Прогон»  17,2x20x7x0,7 ОЦ 08ю	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Омега Хаус», г. Москва	–
4. «Поручень»  56x12,9x1,2 мм Ст. 3	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Ласар», г. Липецк	–

Условное наименование, конфигурация, размеры сечения профиля, материал	Объем внедрения	Участие авторов	Предприятие-заказчик (название, город)	Акт / эффект (тыс. руб.)
5. «Оконный»  35x28x0,5 мм Ст. 3	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Ласар», г. Липецк	—
6. «Лента»  15x1,5x0,5 мм, 20x1,5x0,5 мм, ОЦ 08ю	2 к-та оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Новые промышленные технологии», г. Н. Новгород	—
7. «Кнауф-1»  ПС 100x50x0,55, ПС 75x50x0,55, ПС 50x50x0,55, ОЦ 08пс	3 к-та оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Новые промышленные технологии», г. Н. Новгород	—
8. «Кнауф-2»  ПП 60x27x6x0,55, ОЦ 08пс	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Новые промышленные технологии», г. Н. Новгород	—
9. «Траверса»  30x28x7x1,5 мм, 38x40x10x1,5 мм, 30x20x8x1,5 мм, 27x18x6x1,2 мм, (отверстия в дне), ОЦ 08пс	4 к-та оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Новые промышленные технологии», г. Н. Новгород	—
10. «Дуга тента»  41x21x6x1,2 мм, 08пс	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	«Нижегородский Промышленный Альянс», г. Н. Новгород	—
11. «Залицовка»  88x18x0,55 мм, ОЦ 08пс	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отработка и внедрение	Завод «Металл-Профиль», г. Н. Новгород	*Акт, 400
12. «С-образный»  40x25x1,2 мм, ОЦ 08пс	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отладка и внедрение	Завод «Металл-Профиль»	*Акт, 600

Условное наименование, конфигурация, размеры сечения профиля, материал	Объем внедрения	Участие авторов	Предприятие-заказчик (название, город)	Акт / эффект (тыс. руб.)
13. «Залицовка»  88х37х0,55 мм, ОЦ 08пс	1 к-т оснастки	- разработка схем - разработка КД оснастки - отладка и внедрение	Завод «Металл-Профиль»	*Акт, 450
14. Профили согласно табл. 3.1 (всего 18 штук), материалы Ст. 3, 08кп, 08пс с цинковым и/или полимерным покрытием	18 к-тов оснастки; автоматизированные линии	Участие в исследованиях, разработке схем формообразования, разработке КД оснастки, отработке и внедрении в производство	Предприятия РФ. Головные исполнители: ОАО «Ульяновский НИАТ» и ООО «НПО «ИДМ»	—

* Расчет выполнен в соответствии с методикой работы [27]. Годовой экономический эффект от сокращения затрат на создание технологий в предприятиях-разработчиках г. Ульяновска – более 200 тыс. руб.

На рис. 4.30 и 4.31 представлены некоторые виды внедренных профилей на предприятиях строительной индустрии и в производстве мебели.

Качество изготовленных профилей. На стадии отработки и внедрения производили оценку размерной точности сечений профиля, параметров продольной кривизны, скрутки, кромковой волнистости и бокового выпучивания (при отработке – 100% профилей, при внедрении объем выборки – обычно (5...10) % от каждой партии одного наименования). Использовали измерительные инструменты, указанные в табл. 3.4.



Рис. 4.30. Профили для строительной индустрии

Профили удовлетворяли требованиям, указанным в табл. 1.9, или требованиям технической документации заказчика. В частности, для всех внедренных профилей в поперечном сечении профилей пружинение не превышало $\pm 30'$ при суммарном угле подгибки 90° . Выпуклость и вогнутость стенок профилей не превышали 0,01 наибольшего размера сечения профиля. Местная кривизна профилей (выпучивание или кромковая волнистость) не превышала 1,0 мм на 1 м длины профиля, скрутка вокруг продольной оси отсутствовала.

Исследования поверхностного слоя на изготовленных профилях показали, что нарушений (типа задиров, царапин, трещин, отслоений, зажимов, заусенцев и т. п.) не обнаружено. Коррозионные испытания образцов профилей в камере соляного тумана по определению влияния деформации на свойства антикоррозионных покрытий, нанесенных на оцинкованный лист, показали, что деформация в процессе формообразования профиля не приводила к нарушению целостности ни цинкового, ни защитного покрытия.



Рис. 4.31. Полузакрытые профили, изготовленные МИД

Таким образом, применение разработанного, исследованного и внедренного в производство полузакрытых профилей метода интенсивного деформирования позволило обеспечить: 1) формообразование многоэлементных полузакрытых профилей за малое количество технологических переходов; 2) снижение затрат на разработку и отладку технологии; 3) повышение качества профилей; 4) возможность оптимизации выбора оборудования и его использования в составе автоматизированных линий.

Выводы

1. Новый алгоритм разработки технологии производства полузакрытых профилей существенно меняет ранее использовавшийся порядок проектирования. В частности, расчет ширины заготовки осуществляется не в начале проектной процедуры, а после выбора схемы формообразования.

2. Разработанные рекомендации по расположению профиля в валках, выбору базового элемента и оси профилирования позволяют оптимизировать схему формообразования и сократить число переходов.

3. Рекомендации по обеспечению размерной точности профилей дают возможность повысить их качество и увеличить срок службы роликов.

4. Разработанный классификатор профилировочных станков, основанный на 24 признаках классификации, позволяет производить оптимальный выбор оборудования для реализации технологии и тем самым повысить экономическую эффективность технологии.

5. Рассмотрение особенностей формовки периферийных ЭДТ позволило выработать ряд подходов, направленных на повышение качества профиля и сокращение числа переходов. В частности, завершение формовки ЭДТ должно наступать при угле подгибки несущей полки, не превышающем 60°.

6. Выработанные принципы проектирования технологического оснащения позволяют облегчить процесс отладки технологии, уменьшить трудоемкость и затраты на изготовление оснастки. В совокупности, использование полученных в работе результатов исследований позволить на 15...20 % сократить затраты на освоение технологии.

7. Разработанное с участием авторов оборудование (профилегибочный стан, правильное устройство, отрезной пневматический пресс), используемое в автоматических линиях, внедрено на ряде промышленных предприятий РФ.

8. Разработанные и внедренные с участием авторов технологии производства полужакрытых профилей (несколько десятков) действуют на российских предприятиях четырех отраслей промышленности. Годовой экономический эффект (подтвержденный) составляет 1450,0 тыс. руб.

9. Качество профилей, изготавливаемых по разработанным с участием авторов технологиям МИД, удовлетворяет требованиям нормативной документации и специфическим требованиям заказчиков технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ применения полузакрытых профилей показал, что эффективность их применения на 10 – 30 % выше по сравнению с применением фасонных профилей. Из известных методов изготовления гнутых полузакрытых профилей в условиях мелкосерийного производства предпочтительным является МИД. Анализ работ по теме позволил выявить проблемы, определить материалы, оборудование и номенклатуру профилей для исследования, сформулировать задачи исследований.

2. Разработанные классификаторы полузакрытых профилей, их дефектов и профилировочных станков позволили систематично исследовать и совершенствовать технологию и оборудование с обеспечением высокой эффективности.

3. Модель изменения толщины заготовки и экспериментальные исследования несимметричных полузакрытых профилей показали, что при растяжении имеет место утонение порядка 5 %, а при подсадке – утолщение до 4 %. Теоретические значения отличаются от экспериментальных не более чем на 6 %.

4. Модель расчета напряжений в угловой зоне показала, что при радиусах изгиба ($r/s_0 < 1$) напряжения в упрочняемом материале превышают более чем на 20% соответствующие напряжения в неупрочняемом металле. Экспериментально показано суммарное утонение заготовки до 12% при неравномерном характере изменения толщины по переходам. Расхождение теоретических и экспериментальных данных лежит в пределах 21 %.

5. Решение задачи о подсадке полки показывает, что распределение касательных напряжений имеет вид двугорбой кривой, причем, при торцевом поджатии на уровне $0,7 \sigma_s$ внутренний контур зоны изгиба имеет склонность к складкообразованию. Экспериментальное изучение микротвердости по сечению профилей показало ее увеличение для угловых зон от 12 до 22 %, а по теоретическому прогнозу оно должно было бы достигать 15 %, что позволяет считать теоретическую модель пригодной для практических расчетов. Моделирование подсадки в среде Ansys позволило определить зависимости относительного радиуса, утонения и пружинения от величины подсадки, выявить рекомендуемые области подсадки. Разгрузка наружного контура зоны изгиба при подсадке дает возможность получать радиусыгиба меньше допустимых.

6. Разработанная модель формовки множественных рифтов/гофр в донной части профиля позволяет определить допустимое количество рифтов, формуе-

мых за один переход. Уровень рассогласования теории и эксперимента не превышает 16 %. Экспериментально показано, что формовка рифтов повышает склонность полок с элементами жесткости к потере устойчивости, однако равномерная формовка рифта по переходам или натяг кромки позволяют получать качественный профиль без существенного изменения схемы формообразования аналогичного профиля с гладким дном.

7. Полученное вариационным методом решение задачи о протяженности ЗПП позволяет определять углы «ослабления» при формовке профилей с широким дном, а также предельные углы подгибки. Расхождение теоретических и экспериментальных данных по исследуемому массиву профилей девяти типоразмеров лежит в пределах 16...26 %.

8. Экспериментальное изучение прогибов дна широких полузакрытых профилей показывает уменьшение по сравнению со швеллерами в 1,5 раза протяженности ЗПП и увеличение на 40% глубины прогиба, обусловленные наличием элементов жесткости, что подлежит учету при проектировании процесса.

9. Сформулированные условия отсутствия потери устойчивости и регрессионная модель, полученная в полно-факторном эксперименте 2^3 , позволяют определять предельные углы подгибки, приводящие к кромковой волнистости.

10. Новый алгоритм разработки технологии производства полузакрытых профилей, учитывающий принцип преемственности, расположение профиля в валках, выбор базового элемента, оси профилирования, позволяет оптимизировать схему формообразования, сократить число переходов и увеличить срок службы формующих роликов. Выработанные принципы проектирования технологического оснащения позволяют облегчить процесс отладки технологии, уменьшить трудоемкость, затраты на изготовление оснастки и повысить качество профилей с сокращением на 15...20 % затрат на освоение технологии.

11. Разработанное с участием авторов оборудование (профилегибочный стан, правильное устройство, отрезной пневматический пресс), используемое в автоматических линиях, защищено тремя патентами и внедрено на ряде промышленных предприятий РФ.

12. Разработанные и внедренные с участием авторов технологии производства полузакрытых профилей (более 30) действуют на российских предприятиях четырех отраслей промышленности. Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 1450,0 тыс. руб. и подтвержден актами внедрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тришевский И. С. Производство деталей из гнутых профилей / И. С. Тришевский, В. С. Марьин, В. А. Хмель. —К.: Техника, 1985.— 128 с.
2. Гнутые профили проката. Справочник / Под ред. И. С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1980. – 352 с.
3. 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.
4. Илюшкин М.В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 200 с.
5. Сортамент холодногнутой профилей из оцинкованной стали для строительства. – М.: НАПСГП, 2002. – 150 с.
6. ТУ 1122-181-024946880- 99. Профили стальные гнутые тонкостенные для строительства.
7. ТУ 1122-080-02494680-97. Профили стальные гнутые повышенной жесткости для ограждающих и несущих конструкций.
8. ТУ 1121-029-00110473-98. Профили строительные металлические.
9. ТУ 5262-100-02494680-99. Конструкции стальные из гнутых профилей для облицовки наружных стен зданий.
10. ТУ 5262-101-02494680-99. Конструкции металлической облицовки потолков и стен зданий.
11. ООО ПФ «Иприс» [электронный ресурс]: Харьков: Украина, 2008. – Режим доступа: [http:// www.ipris.com.ua](http://www.ipris.com.ua)
12. ТУ 1120-100-47515705-00. Профили С – образные стальные холодногнутые для строительства.
13. ТУ 1122-075-02494680-2001. Профили стальные холодногнутые для строительства.
14. ТУ 1122-076-02494680-2001. Профили холодногнутые повышенной жесткости из оцинкованной стали для строительства.
15. ТУ 1108-002-25773051-2000. Профили металлические холоднопрофилированные.
16. ТУ 5262-032-02494680-95. Панели стальные бескаркасные с утеплителем для покрытий и стен зданий

17. 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.
18. Филимонов С.В. Схемы формообразования в роликах профилей с элементами жесткости различной высоты в донной части / С.В. Филимонов, М.А. Горин, В.И. Филимонов // Технология металлов, 2007, № 7. – С. 19 – 22.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Марковцев В.А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 244 с.
25. Гнутые профили проката. Справочник / Под ред. И. С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1980. – 352 с.

26. 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.
27. Филимонов С.В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2008. 444 с.
28. Скрипачев А. В. Изготовление из листа профилей повышенной жесткости стесненным изгибом на кромкогибочных машинах. Дисс. канд. техн. наук. – Тула, 1983. – 242 с.
29. 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. БИ № 3.
30. 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.
31. Комаров А. Д. Развитие и совершенствование процессов штамповки деталей эластичной средой / А. Д. Комаров // Кузнечно – штамповочное производство. – 1982. – № 12. – С. 27 – 30.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. Колганов И. М. Разработка и внедрение прогрессивных технологий изготовления волочением-прокаткой профилей и гофров повышенной жесткости из листовых авиационных материалов: Дисс. докт. техн. наук: 05.03.05. – Самара: СГАУ, 2008. — 267 с.

36. Колганов, И. М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования / И. М. Колганов. – Ульяновск: Изд. УлГТУ, 2001. – 108 с.
37. Ершов, В.И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
38. Филимонов В. И. Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В. И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 208 с.
39. 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. – М.: НИАТ, 1992. – С. 30–36.
40. Давыдов В.И. Производство гнутых тонкостенных профилей / В.И. Давыдов, М.П. Максаков. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 240 с.
41. Производство и применение гнутых профилей проката. Справочник / Под ред. И. С. Тришевского. – М.: Metallurgiya, 1975. – 536 с.
42. Тришевский, И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М.: Metallurgiya, 1980. – 288 с.
43. Березовский, С. Ф. Производство гнутых профилей / С. Ф. Березовский. – М.: Metallurgiya, 1985. – 200 с.
44. Филимонов С.В. Разработка технологии интенсивного формообразования гнутых тонкостенных профилей в роликах: Дис. канд. техн. наук: 05.03.05/ Нижегородский гос. Технический ун-т. – Нижний Новгород, 2003. 223 с.
45. Филимонов С.В. Современные технологии производства гнутых профилей в роликах / С.В. Филимонов, В.И. Лапшин, А.В. Филимонов, В.И. Филимонов // Производство проката, 2008, № 12. – С. 16 – 24.
46. Берлет Ю.Н. Деформационные характеристики подгибаемых полок и оптимизация углов подгибки при профилировании / Ю.Н. Берлет, В.А. Марковцев, В.И. Филимонов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2002, № 6. – С. 8 – 12.

47. РТМ 1.4.2005– 90. Изготовление профилей из листов алюминиевых сплавов Д16, В95, 1420 методом стесненного изгиба / Ю.М. Арышенский, Г.В. Проскуряков, В.А. Марковцев В.А., В.И. Филимонов. – М.: НИАТ, 1991. – 85 с.
48. 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.
49. 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.
50. Филимонов В.И. Классификация и тенденции развития профилировочного оборудования / В.И. Филимонов // Производство проката. – 2008. – № 4 . – С. 37 – 43.
51. Колганов И.М. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей и особенности их формообразования / И.М. Колганов, В.А. Марковцев, В.И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность, 2001, № 3. – С. 21 – 25.
52. Филимонов С.В. Технология полузакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования / С.В. Филимонов, В.И. Лапшин, В.И. Филимонов, А.В. Филимонов // Заготовительные производства в машиностроении, 2007, № 5. – С. 41 – 45.
53. 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.
54. Stam GmbH [электронный ресурс]: Treviso: Italia, 2004. – Режим доступа: [http:// www.stam.it](http://www.stam.it)
55. Formach: Impianti di profilatura: Pubblicitario. – Roma: Formach, 2004. – 6 р.
56. Dreistern GmbH [электронный ресурс]: Schopfheim: DBR, 2004. – Режим доступа: [http:// www.dreistern.com](http://www.dreistern.com)
57. Il kwang metal forming: Catalog. – Korea:Zeman, 2004. – 52 р.
58. Samco Ltd [электронный ресурс]: Treviso: Italia, 2004. – Режим доступа: [http:// www.sintech.com](http://www.sintech.com).

59. Cometal: Lignes de profilage: Catalogue. – Grasse: Cometal, 2004. – 24 p.
60. Schlebach: Innovation for roof and wall: Ad-booklet. – Fiedewald: Schlebach, 2004. – 28 p.
61. ООО «Аркада» [электронный ресурс]: Смоленск: РФ, 2004. – Режим доступа: [http:// www.arkada.ru](http://www.arkada.ru)
62. Альта-Транс: Оборудование для производства фасонных изделий из металла: Каталог. – М.: Альта-Транс, 2004. – 12 с.
63. Филимонов С.В. Автоматизированные линии производства гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов, А.В. Филимонов // Производство заготовок в машиностроении, 2008, № 4. – С. 39 – 44
64. Патент РФ на полезную модель № 50886, МПК⁷ В21d 5/06 Профи-легибочный стан / Литвинов В.А., Зарубин Д.П., Филимонов С.В., Лапшин В.И., Филимонов А.В. – Оpubл. 27.01.2006. Бюл. № 03.
65. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали: Справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
66. Аверкиев, А. Ю. Методы оценки штампуемости листового металла / А. Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
67. Яковлев С.П. Обработка давлением анизотропных материалов / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. – Кишинев: Квант, 1997. – 331 с.
68. 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.
69. Арышенский, Ю. М. Получение рациональной анизотропии в листах / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников, В. Ю Арышенский. – М.: Металлургия, 1987. – 141 с.
70. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудова-ния и сооружений: Справочник: В 2 т. Т.1 / Под ред. А. А. Гераси-менко. – М.: Машиностроение, 1987. – 688 с.
71. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудова-ния и сооружений: Справочник: В 2 т. Т.2 / Под ред. А. А. Гераси-менко. – М.: Машиностроение, 1987. – 784 с.
72. ТУ 14-1-4792-90. Прокат тонколистовой холоднокатаный и горячео-цинкованный с органическим (лакокрасочным, органическим, пла-стизоловым) покрытием

73. 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.
74. Филимонов В. И. Возникновение кромковой волнистости при профилировании / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 2002. – № 1. – С. 32 – 38.
75. 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.
76. 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.
77. 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 / Ульяновский государственный технический университет. – Самара: СГАУ, 2004. — 223 с.
78. 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: НГТУ, 2003. – 223 с.
79. 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.
80. 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.
81. 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.

82. 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.
83. 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.
84. 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.
85. 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.
86. 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.
87. Филимонов, В.И. Автоматизированная линия изготовления автомобильных бамперов и методика ее создания. / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 4. – С. 29-31.
88. 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.
89. 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.
90. 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.
91. 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.
92. 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.

93. А. с. 1519812 СССР, МПК⁶ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых зетовых профилей проката / М. Е. Докторов, С. В. Мирошниченко, С. А. Батулин, С. А. Чиж. – Оpubл. 07.11.1989, Бюл. № 41.
94. 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.
95. 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.
96. 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.
97. 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.
98. 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.
99. Филимонов В.И. Классификация элементов двойной толщины в конструкциях гнутых профилей / В.И. Филимонов, М.А. Горин // Сборник трудов 8 всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении». – Пенза:Изд-во ПГУ, 2005. – С. 35 – 40
100. 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.
101. Филимонов В.И. Технология изготовления С-образных профилей с элементами двойной толщины / В.И. Филимонов, М.А. Горин // Избранные труды Российской школы «Наука и технология». Серия «Технология и машины обработки давлением». Екатеринбург: Уральское отделение РАН. 2006. – С. 92 – 96.
102. 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.

103. 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.
104. 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.
105. 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.
106. 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.
107. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
108. 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.
109. Вдовин С. И. Упругопластический изгиб тонкого листа поперечной силой / С. И. Вдовин, С. В. Семин // Кузнечно – штамповочное производство. – 1995. – № 11. – С. 5 – 7.
110. 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.
111. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
112. 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.
113. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

114. Матвеев, А.Д. Пластический изгиб листа при неизменной толщине / А.Д. Матвеев. – Известия вузов: Машиностроение, 1983. – № 1. – С. 12 – 18.
115. Матвеев, А.Д. Деформация при крутом знакопеременном изгибе листа с неизменной толщиной / А.Д. Матвеев. // Известие вузов. Машиностроение. – 1984.– № 1. – С. 11 – 15.
116. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением. / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
117. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
118. Ренне, И.П. Пластический изгиб листовой заготовки / И.П. Ренне // Труды Тульского механического ин-та. – 1950. – Вып.4. – С. 146 – 162.
119. Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
120. 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.
121. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
122. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке /В.П. Романовский – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
123. Аверкиев, Ю.А. Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
124. 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.
125. 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.

126. 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.
127. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
128. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
129. 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.
130. 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.
131. Филимонов А.В. Классификация основных видов полузакрытых гнутых профилей / С.В. Филимонов, А.В. Филимонов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радио-и технических систем: Сборник научных трудов. Вып. 4. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2005. – С. 102-106.
132. Филимонов А.В. Изменение толщины зон сгиба и расчет ширины заготовки замкнутых прямоугольных профилей при их формообразовании методом интенсивного деформирования в роликах / С.В. Филимонов, А.В. Филимонов // Избранные труды Российской школы «Наука и технология». Серия «Технология и машины обработки давлением». Екатеринбург: Уральское отделение РАН. 2006. С. 96 – 102.
133. Филимонов А.В. Расчет заготовки профиля с элементами жесткости / А.В. Филимонов, О.В. Мищенко // Технология металлов, 2007, № 12. – С. 5 – 8.
134. Филимонов А.В. Об упрочнении материала при профилировании ленты с высвобождением угловой зоны / С.В. Филимонов, А.В. Филимонов // Авиационная промышленность, 2008, № 3. С. 23 – 27.

135. 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.
136. Филимонов В.И. Исследование методом конечных элементов процесса профилирования ленты с торцевым сжатием при высвобождении угловых зон / В.И. Филимонов, В.В. Левщанов // Наука и технологии. Избранные труды Российской школы. Серия «Технологии и машины обработки давлением». – М.: РАН, 2005. – С. 66 – 69.
137. Филимонов А.В. Напряжения в угловой зоне при подсадке полки / А.В. Филимонов, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Прогрессивные технологии и оборудование при обработке материалов: научные труды Всероссийского совещания обработчиков давлением. – Ульяновск, 14-16 мая 2007. Ч. 1. – С. 64 – 68
138. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
139. Филимонов С.В. Модель числа переходов и числа гофр при формовке волнистой заготовки / С.В. Филимонов, А.В. Филимонов, П.Н. Денисов, Е. В.Коргутлов // Производство проката, 2008, № 7. – С. 34 – 37.
140. Филимонов С.В. Модель зоны плавного перехода при интенсивном формообразовании профиля из упрочняющегося материала / С.В. Филимонов, А.В. Филимонов, В.И. Филимонов // Производство проката, 2008, № 10. – С. 26 – 32.
141. Позняк Э.Г. Дифференциальная геометрия / Э.Г. Позняк, Е.В. Шикин. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 384 с.
142. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: Пер. с английского / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
143. 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.
144. Филимонов А.В. К расчету утонения полузамкнутых несимметричных профилей при их формообразовании в роликах / А.В. Филимонов, Е.А. Алексеевский, О.В. Мищенко, В.И. Филимонов // Вестник УлГТУ, 2006. - № 2. – С. 36 – 39.

145. Филимонов С.В. Изменение толщины зон сгиба и расчет ширины заготовки замкнутых прямоугольных профилей при их формообразовании методом интенсивного деформирования в роликах / С.В. Филимонов, А.В. Филимонов // Избранные труды Российской школы «Наука и технология». Серия «Технология и машины обработки давлением». Екатеринбург: Уральское отделение РАН. 2006. С. 96 – 102.
146. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов / П.П. Костин. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
147. Филимонов А.В. НДС в угловой зоне при посадке заготовки на наружный контур / А.В. Филимонов, В.Н. Кокорин, О.В. Мищенко // Тезисы докладов 41 НТК УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях». Ульяновск, 2007. – С. 36.
148. Мищенко О.В.. Влияние наличия элемента жесткости на основные характеристики зон сгиба полузакрытого профиля в процессе профилирования / О.В. Мищенко, А.В. Филимонов // Сборник статей XI Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении», декабрь, 2007 г., г. Пенза. – Пенза: ПДНПТ, 2007. – С. 73 – 76.
149. Филимонов А.В. О различии схем формообразования зетового профиля в методе стесненного изгиба и методе интенсивного деформирования / А.В. Филимонов, А.В. Андреев // Современные технологии обработки металлов и средства автоматизации: Тезисы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, г. Тула, 15–17 октября 2008 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – С. 33 – 34.
150. Тан Вин Аунг Исследование процесса гибки с радиальным нагружением / Т.В. Аунг // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2007, № 11. – С. 12 – 14.
151. 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.
152. Филимонов В.И. О рифтах и перегибах заготовки при изготовлении гнутых профилей в роликах / В.И. Филимонов, А.В. Филимонов // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Пластическое деформирование металлов». – Ростов-на-Дону, 2003. – С. 42.

153. Филимонов А.В. Технологические особенности производства полу-закрытых профилей с ЭДТ в роликах / Филимонов В.И., Горин М.А., Филимонов А.В. // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. Вып. 5. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. – С. 174 – 183.
154. Филимонов С.В. Замыкание роликовых калибров / С.В. Филимонов, А.В. Филимонов, М.А. Горин // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем. Труды 5 Всероссийской научно-практической конференции. Ульяновск: УлГТУ. 2007. – 326 с. – С. 299 – 302.
155. 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.
156. Филимонов А.В. Эффект «ослабления» углов подгибки // Вузовская наука в современных условиях: Тезисы докладов 38 научно технической конференции УлГТУ, 26 января – 1 февраля, 2004 г. Часть 1. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2004. – С. 30.
157. С.В. Филимонов, В.И. Лапшин, А.В. Филимонов, В.И. Филимонов Современные технологии производства гнутых профилей в роликах / С.В. Филимонов, В.И. Лапшин, А.В. Филимонов, В.И. Филимонов // Производство проката, 2008, № 12. – С. 16 – 24.
158. Горин М.А. О формовке F-образного профиля с элементами двойной толщины / М.А. Горин, А.В. Филимонов, В.И. Филимонов // Современные проблемы создания и эксплуатации радио и технических систем. Труды 5 Всероссийской научно-практической конференции. Ульяновск: УлГТУ. 2007. – 326 с. – С. 296 – 299.
159. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 184 с.
160. Филимонов А.В. Исследование процесса гофрообразования полок тонкостенных гнутых профилей швеллерного типа под действием остаточных напряжений / А.С. Баранов, А.В. Филимонов // Современные технологии обработки металлов и средства автоматизации: Тезисы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, г. Тула, 15 – 17 октября 2008 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – С. 93 – 94.

161. Филимонов С.В. Классификация профилировочных станков и их применение / С.В.Филимонов, Филимонов В.И., Филимонов А.В. – Вестник машиностроения, 2007, № 12. – С. 67 – 72
162. Филимонов В.И. О способах формовки периферийных ЭДТ / В.И. Филимонов, М.А. Горин, А.В. Филимонов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. Вып. 5. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. – С. 164 – 168.
163. Филимонов А.В. Особенности отработки схемы формообразования в роликах полузакрытого профиля типа «шинорейка» с элементами двойной толщины / А.В. Филимонов, М.А. Горин // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. Вып. 4. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2005. – С. 106 – 111.
164. Заявка на изобретение (патент РФ) № 2007136511 от 02.10.2007 г. Правильное устройство для правки профилей / Колганов И.М., Турундаев К.В., Филимонов А.В. и др.
165. Патент РФ на полезную модель № 49744, МПК⁷ В21 D 22/02 Пресс пневматический для разделительных операций / Литвинов В.А., Зарубин Д.П., Филимонов С.В., Лапшин В.И., Филимонов А.В. – Оpubл. 10.12.2005. – Бюл. № 34.
166. Патент 37221 РФ, МПК⁷ G 01 N 19/04. Устройство для испытания покрытия на отслоение / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов, А. В. Филимонов. – Оpubл. 10.04.04. – Бюл. № 10.