

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

О. В. Мищенко, В. И. Филимонов

**ПРОИЗВОДСТВО ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ
С ОТБОРТОВКАМИ В РОЛИКАХ
МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Ульяновск
УлГТУ
2011

УДК 621.981.1
ББК 34.6
М 71

Рецензенты: Генеральный директор ОАО «Ульяновский НИАТ», канд. техн. наук
В. А. Марковцев;
Заместитель начальника по науке Ульяновского научно-технического
центра ФГУП ВИАМ, д-р техн. наук В. И. Постнов.
Научный редактор доцент кафедры «М и ОМД» УлГТУ, канд. техн. наук
В. Н. Кокорин.

УДК 621.981.1

Мищенко, О. В.

Производство гнутых профилей с отбортовками в роликах методом интен-
сивного деформирования / О. В. Мищенко, В. И. Филимонов. – Улья-
новск : УлГТУ, 2011. – 122 с.

В монографии приведены основные сведения по проектированию, математиче-
скому моделированию, методам расчета и испытаниям при изготовлении гнутых про-
филей с отбортовками.

Книга предназначена для разработчиков технологии стесненного изгиба и метода
интенсивного деформирования гнутых профилей в роликах, а также аспирантов специ-
альности 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением». Книга также может
оказаться полезной технологам и конструкторам, работающим в области профилирова-
ния и создания профилировочного и профилегибочного оборудования.

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

ISBN 978-5-9795-0765-1

© Мищенко О. В., Филимонов В. И., 2011

© Оформление. УлГТУ, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
1.1. Применение профилей с отбортовками	8
1.2. Способы получения гнутых профилей с отбортовками	15
1.3. Профилегибочное оборудование для производства профилей с отбортовками	22
1.4. Классификация дефектов профилей с отбортовками	26
1.5. Применяемые материалы для производства гнутых профилей	31
1.6. Учет факторов процесса профилирования при теоретическом анализе	33
1.7. Выводы	35
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ С ОТБОРТОВКАМИ	36
2.1. Классификация профилей с отбортовками	36
2.2. Расчет развертки сечения профиля и предварительный расчет ширины заготовки	38
2.3. Исследование напряженно-деформированного состояния в зонах изгиба при различном нагружении	40
2.4. Исследование зоны плавного перехода	47
2.5. Определение предельных параметров формовки угловых зон при торцевом поджатии с помощью конечно-элементного анализа	53
2.6. Выводы	57
3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	59
3.1. Организационные аспекты экспериментальных исследований	59
3.2. Исследование влияния вида нагружения на параметры угловых зон	62
3.3. Исследование влияния ширины отбортовки на изменение толщины зон изгиба на основе полного факторного эксперимента	65
3.4. Исследование влияния промежуточных радиусов изгиба заготовки на геометрические параметры сечения профиля	68
3.5. Экспериментальное исследование возможности использования теоретической модели зоны плавного перехода в приложении к фор- мовке сложных профилей с отбортовками	74
3.6. Исследование влияния отбортовок на протяженность ЗПП	81
3.7. Некоторые вопросы устойчивости деформирования профилей с отбортовками	83
3.8. Выводы	84

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ	85
4.1. Проработка профиля на технологичность.....	85
4.2. Выбор схемы и режимов формообразования.....	87
4.3. Разработка профилирующей оснастки.....	91
4.4. Изготовление формующих роликов.....	96
4.5. Отладка процесса формообразования.....	99
4.6. Алгоритм разработки технологии изготовления профилей с элементами жесткости – отбортовками.....	102
4.7. Параметры профилей для ответственных конструкций.....	106
4.8. Внедрение методики, технологии и экономический эффект.....	107
4.9. Выводы.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	110
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	112

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в России наметилась устойчивая тенденция к применению все большего количества гнутых металлических профилей практически во всех отраслях народного хозяйства. За последние 10 лет увеличились не только объемы производства гнутых металлических профилей, но и существенно расширился их сортамент [1].

ГОСТ 14350-80 [2] определяет гнутый профиль проката как профиль, полученный методом профилирования заготовки на профилегибочных агрегатах. Согласно ГОСТ 14350-80 более 50% профилей несут отбортованную часть. Основные элементы гнутых профилей показаны на рисунке.

Сортовые горячекатаные и прессованные профили имеют ограниченную сферу приложения (в основном силовые элементы конструкций), а также такой существенный недостаток, как отсутствие изначального покрытия, обусловленный техническими возможностями процессов горячей прокатки и прессования. Кроме того, в некоторых конструктивных приложениях гнутые профили оказываются предпочтительными как с точки зрения весовой отдачи, так и с точки зрения их эксплуатационной надежности и эффективности [3].

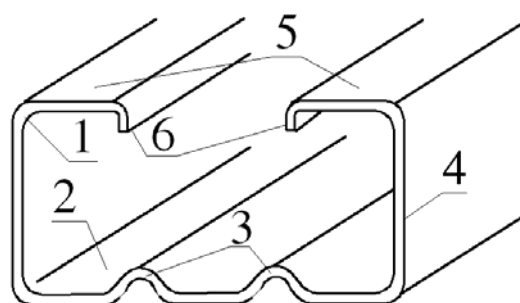


Рис. Основные элементы профиля:
1 – угловая зона; 2 – дно профиля;
3 – продольные рифты; 4 – боковая полка; 5 – горизонтальные полки;
6 – отбортовки

Существует несколько альтернативных способов получения гнутых профилей с отбортовками, а именно: штамповка, гибка на прессах и протяжка в инструментальных фильерах. Однако использование этих способов изготовления затруднительно для получения профилей большой длины с узкими отбортовками. Еще более существенным ограничением этих технологий является получение профилей со сложной конфигурацией поперечного сечения. Кроме того, эти способы приводят к большим потерям металла, они малопроизводительны, себестоимость гнутых профилей оказывается достаточно высокой, что резко ограничивает применение указанных технологий в промышленной сфере.

Традиционное профилирование, использующее крупногабаритное оборудование и большое число переходов, оказывается малоэффективным в условиях меняющейся номенклатуры профилей и их мелкосерийного производства, получившего широкое распространение в последние годы [4].

Одним из прогрессивных методов производства профилей в роликах профилировочных станков является метод интенсивного деформирования (МИД). Его основной особенностью является одновременная формовка всех

элементов профиля, что позволяет существенно уменьшить число переходов, использовать компактное оборудование и тем самым снизить затраты на изготовление профилей, особенно в условиях мелкосерийного производства. Другой отличительной чертой указанного метода является значительное «ужесточение» режимов подгибки элементов профиля.

Однако применение данного метода для производства профилей с периферийными элементами жесткости типа отбортовок ограничивается рядом факторов: отсутствие классификаторов профилей и их дефектов, надежных математических моделей процесса формообразования, рекомендаций по разработке схем формообразования и проектированию технологической оснастки, недостаточная эффективность технологических решений по предотвращению дефектов и повышению качества профилей, и др. Устранение указанных недостатков представляет собой актуальную научно-техническую проблему, требующую решения.

Монография посвящена выработке технических решений, направленных на снижение затрат и повышение качества профилей с периферийными элементами жесткости – отбортовками, изготавливаемых в роликах МИД, на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Объектом исследования являлись процессы формообразования гнутых профилей с отбортовками МИД и средства их реализации. Предметом исследования было совершенствование технологии производства МИД в роликах профилей с отбортовками из стальных и алюминиевых сплавов, а также формующего инструмента для профилей открытого типа.

Методологической и теоретической основой для разработки служили классические работы по механике деформируемого твердого тела, теории профилирования и обработке металлов давлением отечественных и зарубежных исследователей: Ю.М. Арышенского, С.Ф. Березовского, К.Н. Богоявленского, С.И. Вдовина, А.С. Вольмира, Ф.В. Гречникова, Г.Я. Гуна, В.И. Давыдова, М.Е. Докторова, В.И. Ершова, М. Киути, Д. Кокадо, И.М. Колганова, В.В. Колмогорова А.Д. Матвеева, В.А. Марковцева, Е. Онода, В.А. Осадчего, Е.А. Попова, Г.В. Проскурякова, Ю.Н. Работнова, И.П. Ренне, В.В. Соколовского Х. Судзуки, И.С. Тришевского, С.В. Филимонова, Р. Хилла, В.П. Шеногина, а также ряда других ученых.

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

Основной итог выполненной монографии заключается в разработке и практическом апробировании процедуры проектирования роликовой оснастки для изготовления методом интенсивного деформирования гнутых профилей с отбортовками, что позволяет сократить затраты на освоение технологии (до 15%) и повысить качество производимых профилей. Монография завершена внедрением технологии и оборудования на ряде промышленных

предприятий Российской Федерации. Результаты опубликованы в научных изданиях.

Монография выполнена в Ульяновском государственном техническом университете на кафедре «Материаловедение и ОМД» в 2004 – 2009 гг. в соответствии с тематическим планом и по договорам № Д 10-195/20-УП от 20.10.06 г. с ООО НИИ «МИТОМ» (г. Ульяновск), №Д 687 от 21.10.09 г. с ОАО «Ульяновский НИАТ» (г. Ульяновск).

Авторы выражают благодарность сотрудникам базовых предприятий – разработчиков технологий интенсивного деформирования г. Ульяновска (ОАО «Ульяновский НИАТ», ООО «НПО «ИДМ» и др.) за поддержку и помощь, оказанные в процессе выполнения работы.

1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Применение профилей с отбортовками

Совершенство конструкции изделия в сфере производства определяется выполнением требований производственной технологичности, что сводится к возможности применения при ее изготовлении прогрессивных технологических процессов и элементов конструкции, обеспечивающих высокое качество при минимальных затратах средств, труда и времени в процессе конструкторской и технологической подготовки производства и при изготовлении изделий. Гнутые профили с отбортовками, входящие во множество конструкций изделий в строительстве и машиностроении, изготавливаются по различным технологиям. Технология МИД изготовления таких профилей в роликах в наибольшей мере удовлетворяет требованиям производственной технологичности.

Область применения гнутые профили с отбортовками обширна и включает самые различные отрасли (рис. 1.1).

1.1.1. Применение гнутых профилей в авиастроении

Развитие авиакосмической техники связано с необходимостью повышения ресурса при снижении массы конструкций, особенно при создании широкофюзеляжных самолетов нового поколения, что требует освоения новых материалов с повышенными удельными характеристиками прочности для производства профилей повышенной жесткости, создания ресурсосберегающих технологий для производства таких профилей.

Решению данной проблемы во многом способствует применение в конструкции планера панелей и оболочек с подкрепляющим набором в виде профилей из листовых заготовок с элементами жесткости типа отбортовок.

В авиастроении применение гнутых профилей и панелей, подкрепленных ими, для постройки планера летательного аппарата связано с поисками путей снижения массы и повышения ресурса. В отечественном авиастроении используется порядка 200 типоразмеров гнутых профилей из авиационных сплавов разнообразных поперечных сечений, приведенных в табл. 1.1 [5–8].

Таблица 1.1

Применение гнутых профилей в авиастроении

Тип профиля	Количество типоразмеров	Годовой объем, пог. м
Уголок	155	316 000
Зетовый	37	323 500
Корытный	47	474 200
Специальный	5	2100

В конструкциях самолетов крупнейших зарубежных фирм «Боинг», «Локхид», «Норд-Америкен» и других гнутые профили стали применяться с 60-х годов, что значительно повысило ресурс широкофюзеляжных машин.



Рис. 1.1. Обобщающая схема применения гнутых профилей с периферийными элементами жесткости

Используемые подкрепляющие профили представлены в табл. 1.2 [8]. Фирмой РАЙАН еще в 50-х годах были предложены конструкции обшивок с подкрепляющим тонкостенным гофром из стальных жаропрочных сплавов, аналогичных отечественным маркам СН-4 и ВНС-2Н [9].

Разработкой агрегатов конструкций ЛА с широким использованием листовых профилей и деталей занимаются и отечественные конструкторские коллективы предприятий им. П.О. Сухого, им. С.В. Ильюшина, им. А.Н. Туполева, НПО «Молния» и др. [4, 10, 11].

Известны панели разных конструкций с относительной массой m :

$m=1,0$ – панели с сотовым наполнителем для обшивки;

$m=1,86$ – панели, подкрепленные гофром;

$m=1,6$ – панели, подкрепленные Z-образным прессованным стрингером;

$m=1,51$ – панели с гофровым наполнителем;

$m=1,86$ – панели «вафельной» конструкции.

Сотовый наполнитель до 18% снижает передачу нагрузки, а соединительные элементы утяжеляют конструкцию; технологический процесс изготовления панелей трудоемок и требует дорогостоящего оборудования [9]. Панели, подкрепленные прессованными профилями, оказываются более целесообразными, чем подкрепленные гнутыми профилями и гофрами панели, но они уступают последним по ряду конструктивно-технологических характеристик [12].

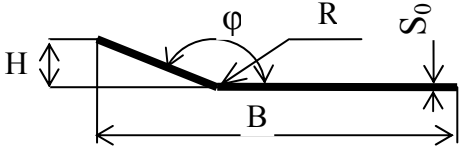
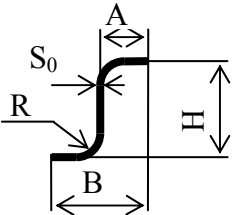
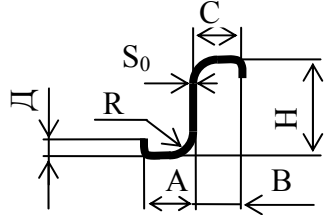
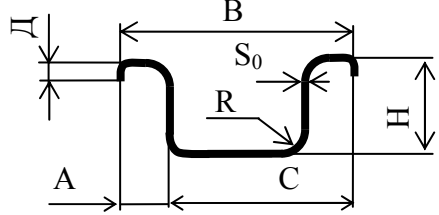
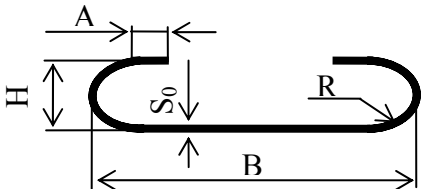
Панели «вафельной» конструкции, получаемые фрезерованием из толстолистового материала, не могут быть признаны эффективными, так как процесс их изготовления трудоемок и до 90% металла идет в стружку. Прессование панелей «вафельного» типа или их изготовление при литье выжиманием мало пригодно для создания тонкостенных конструкций из титановых и других трудно деформируемых сплавов [7].

Традиционные панельные конструкции с подкрепляющим набором из прессованных профилей в перспективных летательных аппаратах не могут иметь широкого применения в связи с необходимостью использования новых высокопрочных и труднодеформируемых сплавов и трудностью получения из них тонкостенных профилей из-за низкой стойкости матрицы, плохого качества поверхности и больших допусков на толщину [9].

Прессованный или горячекатаный профиль имеет более высокую жесткость, чем гнутый профиль, за счет малых относительных радиусов и увеличенной толщины материала по зонам изгиба. Их критические напряжения местной потери устойчивости на 20 – 30 % выше, чем те же параметры гнутых профилей при эквивалентной геометрии сечения. Но изготовление тонкостенных профилей прессованием приводит к увеличению до 20% толщины стенок из-за износа матрицы и значительному разбросу свойств материала по длине профиля из-за колебаний температурно-силовых параметров процесса; начальная часть профиля оказывается весьма рыхлой и даже при хорошо налаженном производстве пресс-остаток составляет до 10 – 15 % [9].

Таблица 1.2

Готовые профили, применяемые зарубежными авиастроительными фирмами

№	Параметры профиля	A (φ°)	B	C	Д	H	R	S ₀
1		80-135	10-43	-	-	15-98	1,6-6,4	0,5-3,2
2		8-52	25-92	-	-	7-77	1,5-5,6	0,3-0,8
3		13-17	25-120	10-45	4-13	13-100	1,0-8,6	0,5-2,3
4		6-25	36-126	16-48	4-22	22-64	2,3-7,1	0,6-2,6
5		1-13	8-35	-	-	10-22	4-11	0,5-1,3

Кроме того, более низкая коррозионная стойкость прессованных профилей по отношению к гнутым из листа профилям существенно ограничивает их использование в пассажирских и транспортных самолетах нового поколения из-за наличия фюзеляжного конденсата, ибо требуются дополнительные меры защиты, усложняющие технологию производства и снижающие эксплуатационную надежность машин [4, 13].

Профили с элементами жесткости из листовых заготовок можно рекомендовать к применению в летательных аппаратах благодаря их следующим преимуществам перед прессованными профилями: относительная простота и малая трудоемкость изготовления; возможность создания заданной геометрии сечения, причем в условиях стандартного заготовительно-штамповочного производства; возможность получения профилей неограниченной длины; повышенная прочность, высокая коррозионная стойкость в связи с наличием лакирующего слоя и меньший допуск на толщину, стабильность полученной геометрии сечения по длине и др. [14].

Листовые профили, выполненные методом стесненного изгиба и интенсивного деформирования, допускают на 10 – 12 % большие напряжения местной потери устойчивости ($\sigma_{кр}$) по сравнению с профилями, полученными обычной гибкой. Это позволяет в конструкциях сжато-нагруженных оболочек и панелей использовать профили меньшей площади поперечного сечения, что снижает массу конструкции. Приближая форму поперечного сечения к идеальному профилю замкнутого сечения – трубе, можно создать наиболее совершенную конструкцию минимальной массы [15, 16].

Приведенный анализ показывает, что применение гнутых профилей с отбортовками, обладающих меньшей подверженностью потери устойчивости за счет повышения жесткости периферийных участков гнутого профиля, может обеспечить конструктивно-технологическое совершенствование планеров летательных аппаратов, повысить их жесткость, ресурс и надежность [9, 12].

1.1.2. Профили с отбортовками, применяемые в строительстве

Применение современных строительных технологий и материалов позволяет создавать высокопрочные конструкции, применяемые для сооружения быстровозводимых зданий (рис. 1.2) [4, 14].

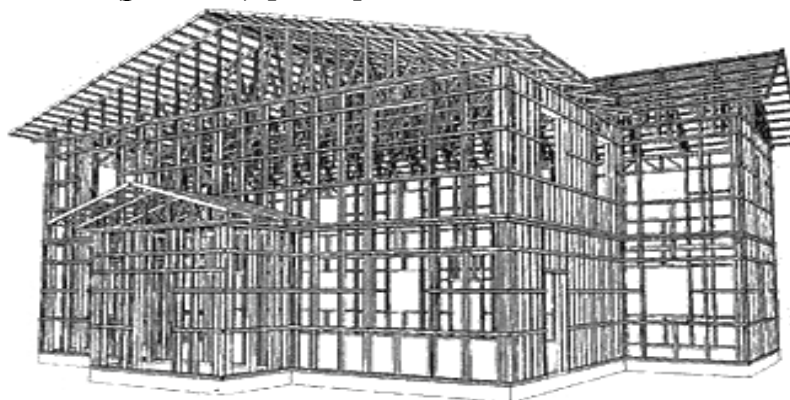


Рис. 1.2. Каркас из оцинкованных профилей

Основу каркаса таких объектов составляют гнутые профили специальных конфигураций. При высоких характеристиках прочности, жесткости и ресурса они имеют невысокую цену и отличное качество. Современные, легкие, прочные гнутые профили выполняют одновременно несколько строительно-архитектурных задач и применяются в сложных профильных конструкциях.

В нежилем строительстве гнутые профили рассматриваются в качестве заменителя горячекатаных профилей, как в несущих, так и прогонных системах. Гнутые профили обладают в 3 – 5 раз меньшей удельной металлоемкостью, большей долговечностью, но меньшим потенциалом по воспринимаемым нагрузкам [17, 18].

В домостроении профили с отбортовками используются в легких стальных тонкостенных конструкциях (ЛСТК), применяемых совместно с волокнистой теплоизоляцией и обшивкой из древесных плит и гипсокартона. ЛСТК относится к технологиям индустриального домостроения, основной принцип которых основан на переносе работ по производству комплекта здания в заводские условия, где конструкции проходят особый контроль. Дома ЛСТК по своей стоимости сравнимы с деревянными каркасными домами: они быстро монтируются на площадке, обеспечивают экономию на работах нулевого цикла, монтажных и отделочных работах, а также на отоплении помещения в процессе эксплуатации [19 – 24].

В настоящее время широкое распространение получили профили для легкосборного строительства: мансардные и фасадные конструкции, каркасы и облицовка вентилируемых фасадов, кровли зданий и сооружений (табл. 1.3).

Профили, применяемые в мансардном строительстве – в основном швеллерного и С-образного типа, имеют возможность взаимной перестыковки, обеспечивают удобство и быстроту сборки конструкции [25, 26].

Значителен процент профилей с отбортовками, применяемых в системах вентилируемых фасадов. Они обеспечивают аэрацию, предотвращая скопление водяных паров, капель воды, вызывающих ускоренную коррозию конструкции. Таким образом, повышается долговечность как самой конструкции, так и наружных облицовочных профилей [27 – 30].

Профили, применяемые для облицовки и утепления фасадов здания – сайдинг, софит и доборные элементы, такие как внешний и внутренний угол, начальная и финишная фланка, также имеют отбортованную часть [14].

Таблица 1.3

Профили с отбортовками, применяемые в строительстве

№ п/п	Сечение профиля	Наименование	Применение
1		Швеллер	Широкая область применения: строительство, различные силовые, несущие, армирующие элементы

№ п/п	Сечение профиля	Наименование	Применение
2		Швеллер	Аналог. п.1
4		Корытообразный	Аналог. п.1
5		С-образный	Аналог. п.1
6		С-образный	Аналог. п.1
7		Профиль	Сайдинг
8		Профиль	Поручень лестничных маршей
9		Профиль	Дверной проем, оконный переплет
10		Профиль	Дверной проем, оконный переплет
11		Корытообразный	Теплица

Применение отбортованных профилей для строительства обеспечивает высокую жесткость, быструю сборку конструкции, надежность, а также повышенную коррозионную стойкость за счет применения материалов с покрытием и, следовательно, долгий срок эксплуатации конструкции [31 – 33].

1.1.3. Применение гнутых профилей в машиностроении

Автомобильная промышленность является одним из самых крупных потребителей гнутых профилей. В табл. 1.4 показаны некоторые типы профилей, которые идут на изготовление деталей планок сидений, окантовки окон, каркаса сидения, соединения панельных дверей, обоймы уплотнителя поворотного стекла, сточного желоба крыши, уплотнителя фланца задней двери, облицовки сточного желоба, окантовки дверей, направляющих подлокотника и многих других деталей наружной и внутренней отделки автомобилей [34 – 38].

В сельскохозяйственном машиностроении гнутые профили находят применение в комбайнах, косилках, культиваторах, сеялках, плугах, стогометателях, зерноочистительных и картофелеуборочных машинах, разбрасывателях

удобрений, тракторных прицепах различной грузоподъемности и назначения и многих других машин (например, корытные профили 34×15×37×2 мм, 30×8×18×2 мм и специальный профиль 102×15×3 мм [39]).

Таблица 1.4

Профили с отбортовками, применяемые в машиностроении

№ п/п	Сечение профиля	Наименование	Применение
1		Уголок	Окантовка, декоративный профиль для скрытия различных щелей, вместе с тем может использоваться как силовой элемент
2		Профиль	Коробка телефонной линии
3		Корытообразный	Аналог предыдущего
4		Корытообразный	Теплица
5		Профиль	УАЗ: Обойма опускного стекла
6		Профиль	ВАЗ: Порог
7		Корытообразный	Бампер ВАЗ-2108

В вагоностроении гнутые профили позволяют получать совершенно новые конструктивные решения по отдельным узлам и элементам вагонов со снижением трудовых затрат на их изготовление при высоких прочностных характеристиках. В конструкции четырехосных цельнометаллических вагонов около 25% его массы составляют гнутые профили, что позволяет создать полувагон с высокими эксплуатационными качествами и эстетичным, современным внешним видом. Стоимость изготовления вагона из гнутых профилей по сравнению с аналогичными штампованными снижается на 5 – 10 % [40].

1.2. Способы получения гнутых профилей с отбортовками

Все способы гибки профилей с периферийными элементами жесткости можно отнести к основным пяти разновидностям (рис. 1.3): гибка в кромкогибочных машинах, гибка в штампах, гибка-волочение, гибка-прокатка и комбинированный метод [9].

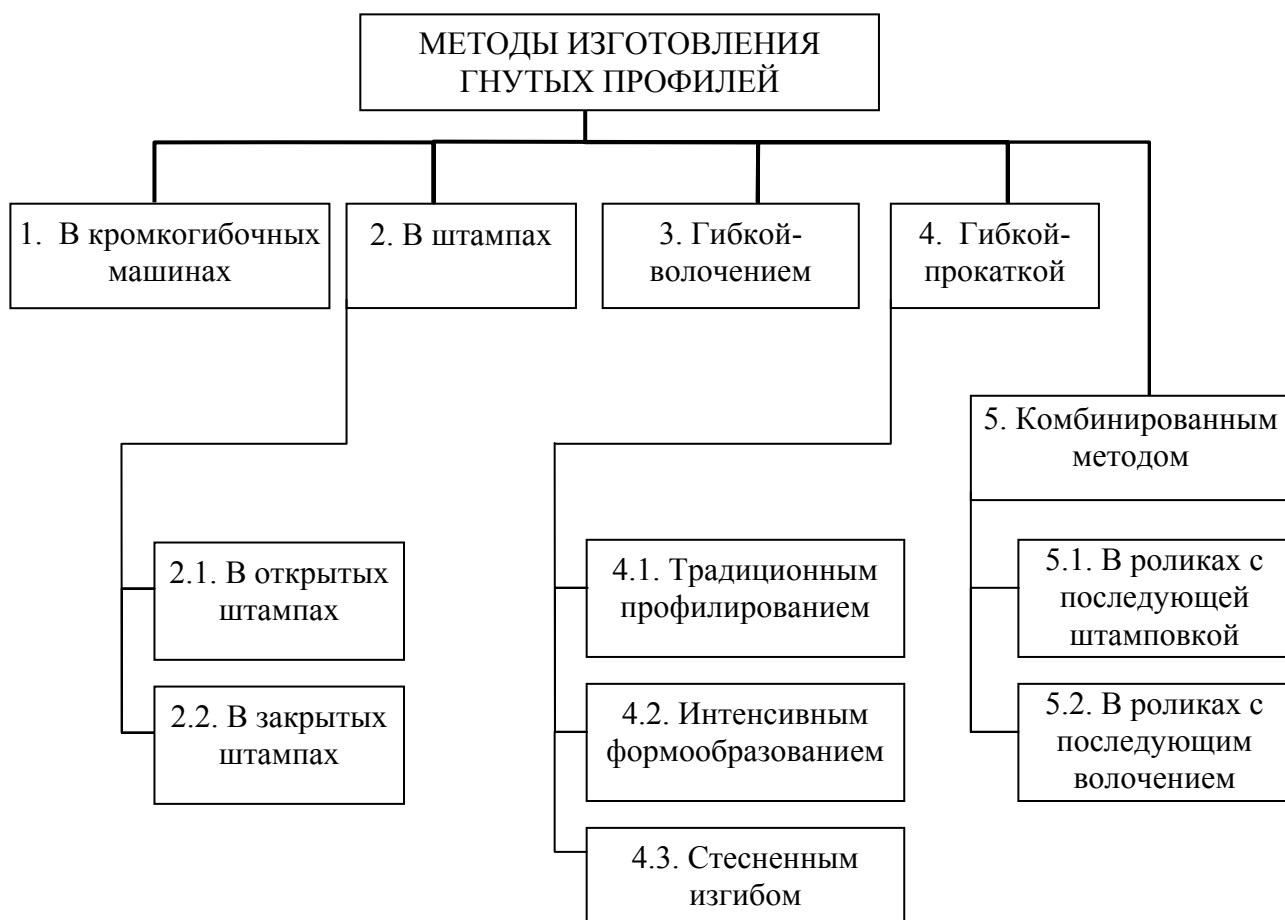


Рис. 1.3. Классификатор методов изготовления гнутых профилей

Ниже дается анализ применения методов изготовления гнутых профилей с целью выбора наиболее приемлемого метода с широкими технологическими возможностями, адаптируемого к условиям мелкосерийного производства.

1.2.1. Изготовление профилей в кромкогибочных устройствах

В кромкогибах профили получают из плоской заготовки с приложением изгибающего момента и сжимающей силы в процессе формообразования угла с малым относительным радиусом (рис. 1.4). Технологический процесс сводится к изгибу концевой части заготовки или получению деталей с несколькими зонами изгиба при перемещении материала в перпендикулярном линиигиба направлении. Приложение сжимающей силы P_t обеспечивает более короткую траекторию перемещения торца заготовки, чем при обычной гибке (Δl), при этом для осуществления стесненного изгиба ось вращения поворотной части устройства смещают в верхнюю полуплоскость на расстояние h .

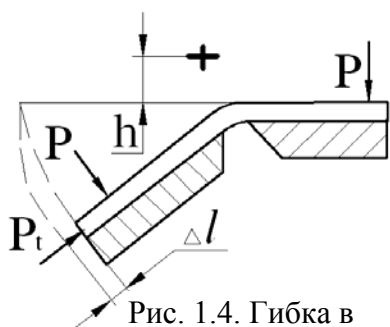


Рис. 1.4. Гибка в кромкогибочных устройствах

Кромкогибочные устройства удобны в работе при изготовлении профилей небольшой длины, а также при проведении экспериментальных исследований гибки новых, в том числе композиционных

(армированных волокнами и дисперсно-упрочненных) материалов небольших толщин на малые радиусы [9]. Однако в схемах с торцевым поджатием и небольшим усилием прижима возможна потеря устойчивости кромки заготовки [41]. Применение кромкогибочных устройств имеет следующие недостатки: высокая стоимость оборудования, относительно низкая точность получаемых деталей, ограниченные технологические возможности (сравнительно небольшая длина профиля и весьма ограниченный состав типоразмеров профилей по сечению), низкая производительность [42 – 44]. Поэтому данный метод не получил широкого распространения при производстве профилей с отбортовками.

1.2.2. Изготовление профилей в штампах

Процесс изготовления профилей в штампах наиболее изучен [45 – 47]. Его отличительной чертой является возможность создания в закрытом штампе больших сжимающих усилий, обеспечивающих гибку на малые радиусы и утолщение материала по зонам изгиба. Созданы штампы, в которых гибка осуществляется при непрерывном действии сжимающих сил в процессе деформирования заготовки, и штампы, в которых плоская заготовка предварительно изгибается на большой радиус ($r < 5S_0$), а затем, при создании дополнительных сжимающих усилий, осуществляется изгиб с малым относительным радиусом (рис. 1.5,а-б). Возможны варианты формовки профилей по так называемой «обратной» схеме, в которой на предварительных переходах формуют рифт в средней части широкой заготовки, а в последнем переходе осуществляют осадку рифта для заполнения угловых зон профиля. Способ обеспечивает в зависимости от свойств материала утолщение по зонам изгиба до 30 %.

В других случаях заготовку сначала профилируют с радиусом и углом изгиба больше заданного, затем производят ее разгибание при одновременном уменьшении радиуса. В результате в зоне изгиба возникают дополнительные тангенциальные сжимающие силы для обеспечения малого радиуса зоны изгиба. В комбинированной схеме формовки предварительно, перед осадкой материала в штампе, профилируют заготовку в роликах. Для осадки криволинейных поверхностей в матрице или пуансоне предусмотрен один уклон 1/1000, а длинномерный профиль изготавливают при шаговой подаче профилированной заготовки. Чем больше разность между шириной исходной полосы и шириной развертки готового профиля, тем меньше радиус в зоне изгиба [48].

Чтобы исключить микротрещины, возникающие на внутренней поверхности зоны сгиба в плакиро-

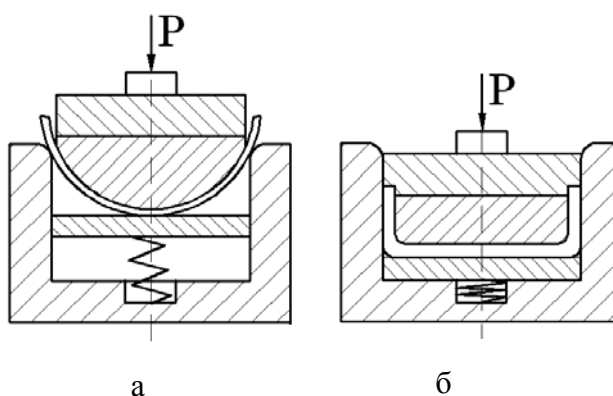


Рис. 1.5. Гибка стесненным изгибом в штампах: а – первый переход (гибка на большой радиус); б – окончательное формообразование профиля

ванном слое вследствие действия знакопеременной нагрузки, предложено вести процесс в штампе, пуансон и матрица которого составные (рис. 1.5), а вставки пуансона, и матрицы подпружинены, например, полиуретаном [40].

Однако гибка листовых деталей в традиционных штампах имеет существенные недостатки [49 – 53]:

1) в зонегиба образуется нежелательное утонение материала; 2) минимальный радиусгиба не менее трех толщин изгибаемого материала; 3) пружинение изгибаемых элементов значительное и нестабильное.

Эти недостатки препятствуют использованию данного метода при производстве профилей с отбортовками, особенно сложной геометрической формы.

1.2.3. Изготовление профилей гибкой-волочением

Получить профиль с малыми относительными радиусами и локальным утолщением по зонам сгиба можно при протягивании листовой заготовки через фильеру (рис. 1.6). Волочение за счет аксиального растяжения разгружает при стесненном изгибе очаг деформации, что позволяет уменьшить число переходов при изготовлении фасонных профилей, исключает отрицательное влияние сдвиговых деформаций по высоте профиля, что имеет место при прокатке, повышает точность размеров и качество поверхности, дает возможность обойтись без калибровки.

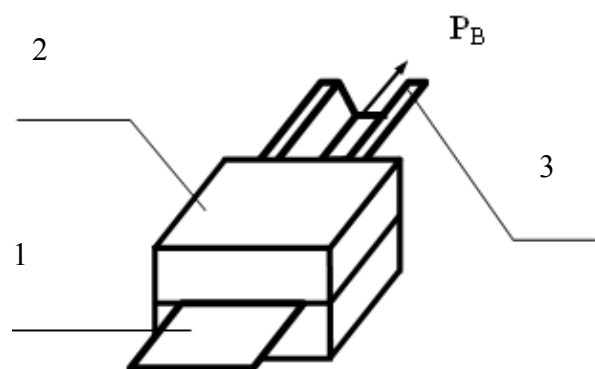


Рис. 1.6. Формообразование профиля при протягивании заготовки через инструментальную фильеру:

1 – листовая заготовка; 2 – фильера;
3 – профиль

При волочении через инструментальную фильеру происходит постепенное свертывание листовой заготовки с одновременным созданием сил сжатия по её торцам, благодаря превышению ширины заготовки на определенную величину ширины развертки калибра фильеры. Торцевые силы сжатия создают осадку материала в процессе формообразования угла, обеспечивается подгибка на малые радиусы и утолщение материала по зонам изгиба [9, 54 – 58].

При волочении целесообразно протягивать заготовку через роликовую фильеру или сочетать волочение с дру-

гими способами. В роликовой фильере значительно по сравнению с инструментальной снижаются контактные напряжения в очаге деформации, что улучшает качество поверхности профиля, появляется возможность выравнивания напряжений по сечению профиля за счет сил волочения, что снижает пружинение материала. В обоснованных случаях режим волочения можно применять при реализации метода интенсивного деформирования за счет отключения привода некоторых профилирующих клеток.

1.2.4. Изготовление профилей гибкой-прокаткой

Изготовление гнутых профилей **методом гибки-прокатки** обладает рядом преимуществ перед другими способами [59, 60]:

1. Высокая производительность;
2. Возможность совмещения процесса изготовления гнутого профиля с его резкой в заданный размер;
3. Возможность получения длинномерных сложнопрофильных деталей;
4. Возможность совмещения процесса пробивки различных отверстий (перфорации) в металлической ленте с заданным шагом с профилированием ленты в заданный профиль;
5. Возможность совмещения процесса профилирования и гибки уже готового профиля на заданный радиус.

Сущность процесса профилирования заключается в последовательном изменении формы поперечного сечения заготовки (металлическая лента, полоса) при прохождении ее через ряд вращающихся навстречу друг другу, последовательно установленных пар роликов [61]. Гибка осуществляется в несколько переходов. Сначала получают профилированную заготовку с радиусами больше заданных [62 – 64], а затем – профиль окончательной формы сечения с малыми относительными радиусами (рис. 1.7) [9]. Для этих целей используются гибочно-прокатные станки с роликовым формирующим инструментом. Особенностью данного процесса является то, что из-за близкого расположения (обычно спаренных) клеток заготовка пребывает в пластическом состоянии и подвергается многократной переформовке. Данный способ мало пригоден для производства профилей из низкопластичного материала или материала с покрытием.

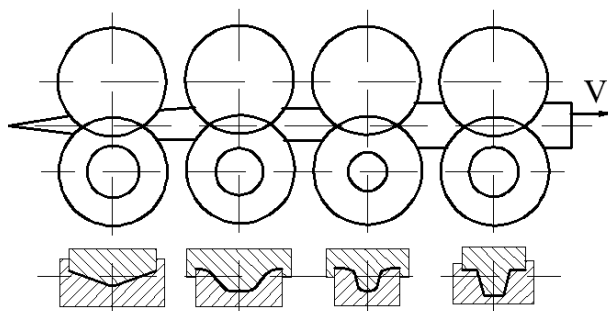


Рис. 1.7. Схема гибки-прокатки в роликовом инструменте

Формообразование профилей в роликах является наиболее универсальным методом производства профильной продукции, которое может быть условно разделено на традиционное профилирование, интенсивное деформирование и стесненный изгиб.

ТРАДИЦИОННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ (ТП) предусматривает использование многоклетевых профилегибочных машин с числом клеток от 10 до 52, причем катающие диаметры роликов обычно более 300 мм. Скорость профилирования располагается в диапазоне от 30 до 60 м/мин. В настоящее время в условиях постоянного совершенствования конструкций профильных деталей ТП не является оптимальным способом изготовления гнутых профилей в связи с его ориентацией на массовый 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 [25, 60].

Существует большое разнообразие способов производства гнутых профилей по схемам традиционного профилирования [65 – 86]. Эти способы подробно анализируются в работе [4]. Ряд технических решений по указанным способам принят нами в рассмотрение при выполнении работы.

Для создания условий **СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА** (СИ) ширина плоской заготовки должна превышать ширину развертки калибра. Осадка криволинейных участков профилированной заготовки, прилегающих к угловым зонам, создает дополнительные силы, позволяющие получить в ограниченном контуре локальный набор материала по зонам изгиба профиля и малые относительные радиусы. Возможны схемы с торцевым поджатием при плоской стенке, однако для набора утолщения в угловой зоне данная схема пригодна лишь для профилей с малой шириной полок (до $(20...30)S_0$). Увеличение ширины полки приводит либо к потере устойчивости (неплоскостности полки в поперечном направлении), либо к кромковой волнистости.

В отличие от ТП и СИ, давно известных и хорошо изученных технологий изготовления гнутых профилей, **МЕТОД ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ** (МИД) представляет собой сравнительно новую технологию производства гнутых профилей в валках профилегибочных станков. МИД, находясь на «стыке» уже известных технологий, представляет собой некий компромисс между традиционным профилированием и стесненным изгибом [87].

Его отличие от ТП состоит в интенсификации схем формообразования: в использовании меньшего числа переходов и более жестких режимов подгибки полок, в применении закрытых по всем переходам калибров, в некоторых случаях приложении небольших по сравнению с СИ торцевых сил к прямолинейным полкам. Метод СИ был создан Проскураковым Г.В. для нужд авиационной промышленности и предназначен для изготовления гнутых мелкосортных профилей типовой конфигурации из труднодеформируемых авиационных сплавов [88 – 91]. В отличие от СИ, ориентированного на осадку волнообразной заготовки при ее избыточной ширине и создающего большие силы торцевого поджатия, МИД не предусматривает переформовку заготовки за счет приложения осаживающих сил к поверхности заготовки (рис. 1.8).

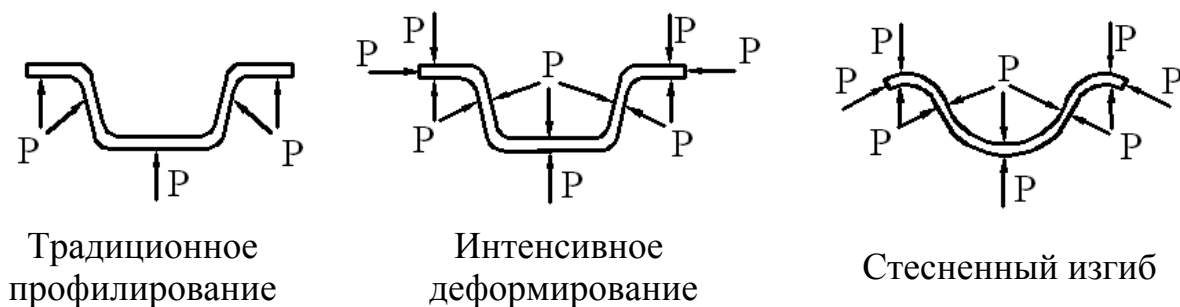


Рис. 1.8. Схемы нагружения при различных схемах профилирования

В табл. 1.5 [25] приведены основные технологические особенности, отличающие МИД от других методов изготовления гнутых профилей в роликах профилегибочных станков. При реализации МИД нейтральный слой напряжений в зоне изгиба, как правило, совпадает со средней линией материала заготовки, в то время как при других методах он смещается: при традиционном профилировании – к внутреннему контуру, при стесненном изгибе – к наружному.

Таблица 1.5

Характеристика методов формообразования профиля в роликах

Показатель	Традиционное профилирование	Метод интенсивного деформирования	Стесненный изгиб
1. Толщина заготовки, мм	0,5...12,0	0,5...3,0	0,5...3,0
2. Скорость профилирования профилей сложного сечения, м/мин	до 180	до 20	до 15
3. Углы подгибки за переход, град.	8..12	10...40	10...40
4. Тип калибра	Открытый	Закрытый	Закрытый
5. Число переходов	N	(0,4...0,7)×N	(0,4...0,6)×N
6. Приложение дополнительных сил	–	Аксиальная, торцевая	Торцевая
7. Правильное устройство	Не обязательно	Обязательно	Обязательно
8. Режим формовки радиуса сгиба	Плавный по переходам	На первых переходах	На последних переходах
9. Отношение внутреннего радиуса гибки к толщине материала исходной заготовки	$r_B/s_0 > (r_B/s_0)_{\text{допуст.}}$	$r_B/s_0 > 0,5$	$r_B/s_0 > 0$

Из этого следует, что при интенсивном деформировании происходит разгрузка контура зоны сгиба, что дает возможность достигать меньших радиусов изгиба без разрушения заготовки. Это позволяет повысить характеристики жесткости и прочности профилей, работающих в конструкциях под нагрузкой.

1.2.5. Изготовление профилей комбинированным методом

Предпринимались попытки комбинирования различных методов с целью обеспечения повышенной жесткости профиля за счет утолщения в угловой зоне. Так, в работе [92] описана технология, предусматривающая изготовление волнообразной заготовки в роликах с последующей осадкой ее в закрытом штампе до получения окончательной конфигурации детали. Эта технология связана с необоснованными затратами ТПП и производства.

Известна технология производства длиномерных профилей повышенной жесткости из дисперсно-упрочненного композита АБМ-1, в которой профили-

рование в роликах с нагревом до 600 °С совмещалось с волочением заготовки с помощью цепного привода ЦС-18 при скорости 6 м/мин [88, 93].

Комбинирование объемного деформирования и локального нагрева позволяет получать профили из труднодеформируемых материалов при скорости профилирования от 3 до 15 м/мин на стане СПК-300М [94].

Рассмотренные технологии обладают по сравнению с МИД рядом недостатков, указанных выше. Сегодня наиболее эффективным и прогрессивным методом производства гнутых профилей в условиях мелкосерийного и серийного производства является **МЕТОД ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ** заготовки в валках профилегибочного станка, совмещающий универсальность и эффективность при использовании малогабаритного и сравнительно недорогого оборудования, обладающего широкими технологическими возможностями.

1.3. Профилегибочное оборудование для производства профилей с отбортовками

Формообразующее оборудование для производства гнутых профилей с отбортовками включает кромкогибочные станки, зигочные машины, а также профилегибочные агрегаты.

Кромкогибочные станки (рис. 1.9) позволяют облегчить процесс изготовления малого борта. Кромка отгибается как по внешнему радиусу, так и по внутреннему. Высота кромки, минимальные внутренний и наружный радиус зависят от модификации станка [95 – 97].



Рис. 1.9. Кромкогибочные станки

Данный вид оборудования значительно повышает качество продукции, упрощают процесс производства и увеличивают производительность предприятия. В табл. 1.6 [95] приведены технические характеристики ряда кромкогибочных станков используемых в современной промышленности.

Таблица 1.6

Характеристики кромкогибочных станков компании «МОССКЛАД»

№ п/п	Модель	Толщина металла (400 N/mm ²), мм	Высота кромки, мм
1	Кромкогибочный станок RAS 21.20	0.5 – 1.5	6 – 15
2	Кромкогиб SW, var. 1	0.6 – 1.3	7
3	Кромкогиб Master Flange KG 15/1.5	0.5 – 1.5	6 – 15

Однако кромкогибочные станки отгибают кромку только на 90 градусов по краю радиусных заготовок фасонных деталей, что значительно сужает область их применения. Кромкогибочные станки используются преимущественно в производстве прямоугольных воздуховодов (рис. 1.10).

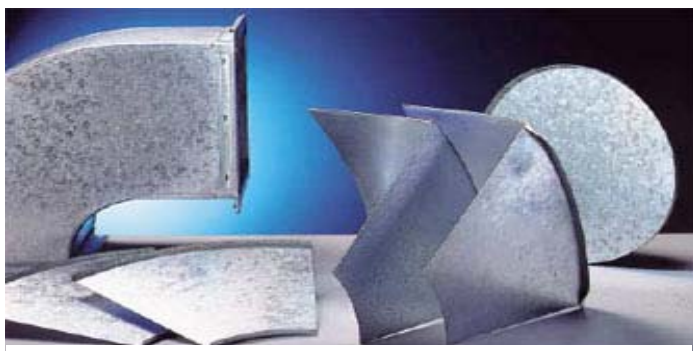


Рис. 1.10. Изделия, получаемые на кромкогибочных станках

Зиговочные машины (рис. 1.11) созданы для мелкосерийного производства воздуховодов, водостоков, изоляции. В ряде случаев их можно использовать для получения профилей с отбортованной частью; наиболее типичные операции – изготовление доборных элементов кровли и сайдинга [97].

В табл. 1.7 [95] приведены технические характеристики зиговочных машин, используемых в современной промышленности в условиях мелкосерийного или единичного производства. Однако применение в серийном производстве данного вида оборудования ограничено трудностью автоматизации и большими трудовыми затратами при работе с ним. Кроме того, получение отбортовок шириной менее 4 толщин материала на них практически невозможно.



Рис. 1.11. Зиговочная машина

Таблица 1.7

Технические характеристики зиговочных машин компании «МОССКЛАД»

№ п/п	Модель	Тип привода	Вылет роликов, мм	Толщина металла (400 N/mm ²), мм
1	Зиговка ТМ 0.8 (КК)	Ручной	110	0.8
2	Зиг-машина ТМ 1.2 (ВК)	Ручной	140	1.2
3	Зиговочная машина RAS 11.15	Ручной	200	1.25
4	Зиговочная машина S250/50	Ручной	250	1.0

№ п/п	Модель	Тип привода	Вылет роликов, мм	Толщина металла (400 N/mm ²), мм
5	Зиг-машина SM 63	Ручной	250	1.75
6	Зиг-машина ACL LX15	Электрический	120	1.5
7	Зигочная машина ZM 50/1.25	Электрический	200	1.25
8	Зигочная машина ITM 1.2	Электрический	240	1.2
9	Зигочная машина RAS 11.35	Электрический	200	1.25
10	Зигочная машина RAS 12.35	Электрический	255	1.75

Профилегибочные агрегаты — основное оборудование для производства гнутых профилей – в зависимости от характера работы и назначения имеют различный состав. Наиболее полно снабжены механизмами высокопроизводительные агрегаты с непрерывным процессом профилирования. В состав оборудования входят: разматыватель с загрузочным устройством, листопрямляющая машина, ножницы гильотинные, сварочная машина с гратоснимателем для сварки концов заготовки в непрерывную ленту, накопитель заготовки, правильная машина, профилегибочный стан, сварочная машина для продольной сварки кромок профилей с гратоснимателем, устройство для удаления эмульсии, устройство для разрезки профилей, промасливающая установка, укладчик [96].

Профилегибочные агрегаты/станки (рис. 1.12), используемые в современной промышленности, редко содержат весь приведенный перечень оборудования. Они обеспечивают получение заданной конфигурации гнутых профилей и их надлежащее качество [4, 96, 98].

Процесс формообразования гнутых профилей на станах заключается в последовательном изменении формы поперечного сечения исходной заготовки — листа, полосы или ленты при прохождении ее через ряд пар вращающихся навстречу друг другу приводных и холостых валков.

Стан состоит из совокупности рабочих клеток, имеющих чаще всего по два горизонтальных валка, приводные – либо оба валка, либо один из них. Число клеток, участвующих в процессе профилирования, зависит от размеров сечения и сложности профиля. В необходимых случаях применяют межклетьевые проводки, чаще всего в виде вертикальных (эджерных) роликов, предназначенных как для удержания заготовки от смещения, так и для подгибки элементов профиля.

Линия по изготовлению гнутых профилей (рис. 1.13), содержащая профилегибочный станок в качестве основного агрегата, работает следующим образом: рулон металлической ленты с помощью кран балки устанавливается на разматыватель. Концевой участок рулона заправляется вручную в направляющее устройство профилегибочного стана (где происходит ее центрирование относительно оси профилирования), а затем в формующие ролики первой профилирующей клетки.

Лента формируется в заданный профиль в соответствии с технологической оснасткой, установленной на рабочих валах станка. За последней профилирующей клетью установлено правильное устройство с правильными роликами. Профиль, проходя через правильное устройство, приобретает необходимую прямолинейность или кривизну, после чего поступает в устройство для отрезки профиля. Отрезанный в размер профиль перемещается на приемный стол и сбрасывается в тару [4, 99].

В таблице 1.8 [100] приведены технические характеристики ряда профилегибочных линий, используемых в современной промышленности.

Подробные сведения о различных типах станков, выпускаемых зарубежными и отечественными производителями, даются в работе [4].

Для исследований процесса формообразования гнутых профилей с отбортовками было выбрано оборудование российских фирм ОАО «Ульяновский НИАТ», ООО «Спецтехнология», предназначенное для реализации МИД и поставляемое заказчикам технологий в составе профилировочных линий.



Рис. 1.12. Профилегибочный станок



а

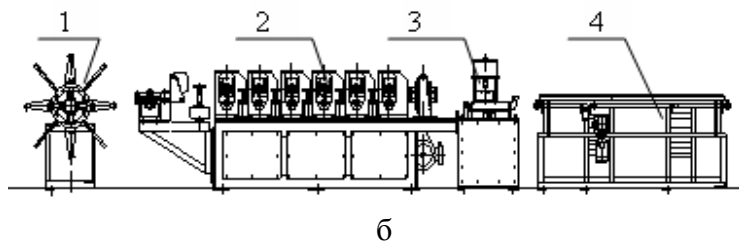


Рис. 1.13. Линия профилирования [25]:

а – натурный образец; б – структурная схема:

1 – разматыватель; 2 – профилегибочный станок;

3 – устройство для отрезки профиля; 4 – укладчик

Таблица 1.8

Характеристики профилегибочных линий «АМТинжиниринг»

Линия	Исходный материал		Высота профиля, мм / вид покрытия	Макс. скорость профилирования, м/мин	Установленная мощность, кВт
	Толщина, мм	Ширина, мм			
LPRF60.U	0,5 – 0,9	1250	75	50	80
LPRF100.U	0,5 – 1,0	900/1000	50/100	40	70
LPRF200.U	0,5 – 1,0	1100/1250	150/200	40	100
LPRF160.U	0,5 – 2,0	900/1500	160	40	90
PRF 8	0,5 – 0,8	1250	8	40	18
PRF 21	0,5 – 0,7	1250	21	40	22
PRF 35	0,5 – 0,8	1250	35	40	32
PRF 60	0,5 – 0,9	1250	60	40	32
PRF 75	0,7 – 0,9	1250	75	40	60
PRF 114	0,8 – 1,0	1250-1500	114	20	72
LGRF50	0,55 – 2,0	80–350 (450)	Цинковое, полимерное	50	12
ЛПБ 55	0,7 – 1,5 (3,0)	До 337	Цинковое	40	36
ЛПЭК 450	0,5 – 0,7	Масса рулона – 2 т	Цинковое, полимерное	25	Длина профиля 2000 – 3000 мм
ЛТ 350	0,5	Масса рулона – 2 т	Цинковое, полимерное	16	Длина профиля
ЛПКТ 100	0,5 – 0,7			20	

1.4. Классификация дефектов профилей с отбортовками

Основные преимущества холоднокатаных профилей – практически неограниченный набор получаемых поперечных сечений, сравнительно высокая производительность, эффект упрочнения материала, обусловленный особенностями процесса профилирования. С другой стороны, достаточно высокие затраты, возникающие вследствие отбраковки изделий, требуют подробного анализа причин, приводящих к таким потерям. В данном разделе представлен обобщенный классификатор дефектов профилей с отбортовками (рис. 1.14), с перечнем возможных причин их возникновения.

Дефекты пространственной формы возникают вследствие различного вида нарушений режимов и схем формообразования. Прогиб в вертикальной плоскости (продольный прогиб) профиля (рис. 1.14, схема 1.1; рис. 1.15, а) может иметь место вследствие следующих причин: ошибка в выборе диаметров формирующих роликов, неверное положение оси профилирования в вертикальной плоскости, неравномерный зазор роликового калибра, отклонения ширины заготовки, неверная настройка правильного устройства. Эта разновидность

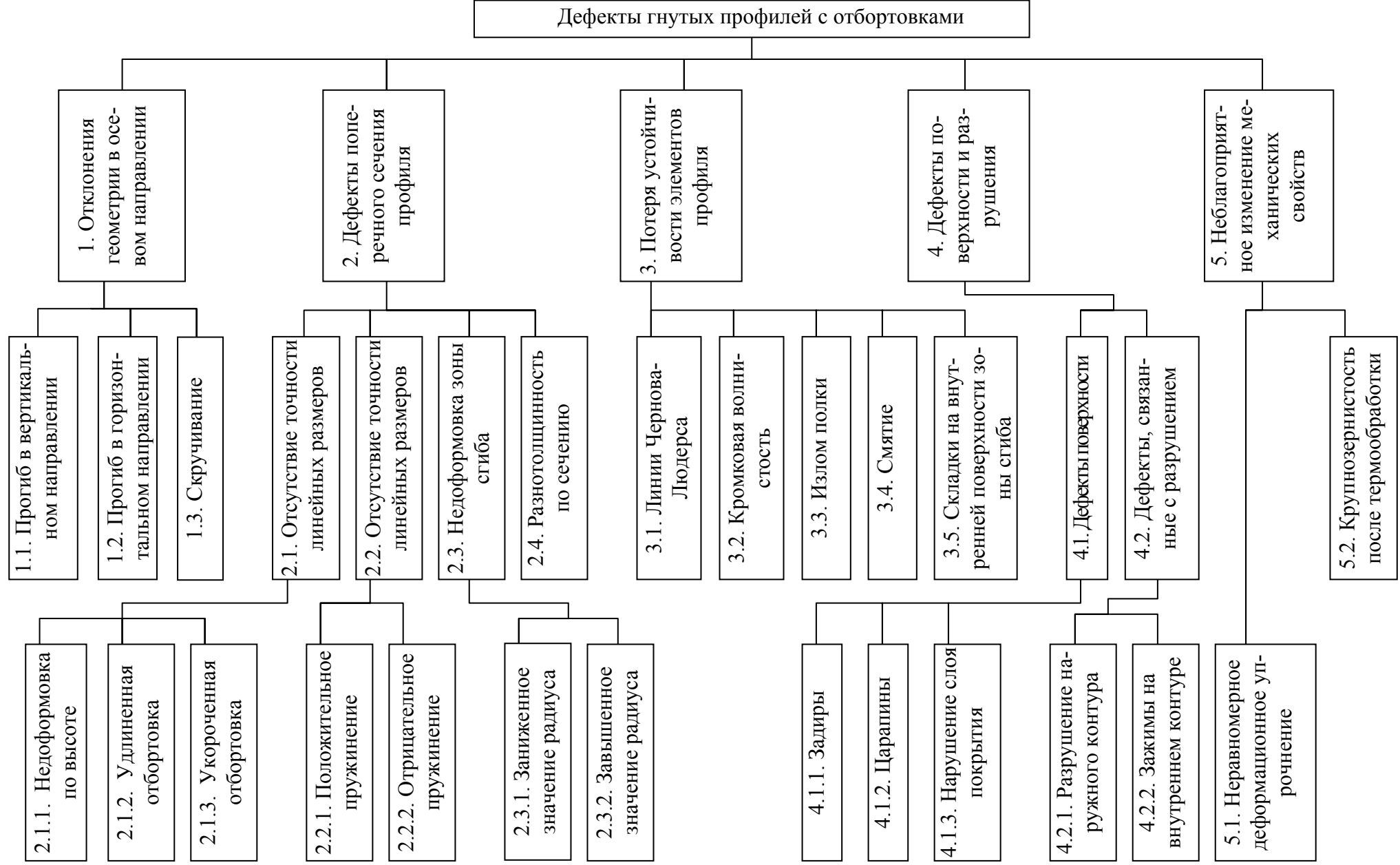


Рис. 1.14. Классификация дефектов профилей с периферийными элементами жесткости

дефектов наблюдается на профилях практически всех типоразмеров, что связано с различием продольных деформаций подгибаемых полок и дна профиля вследствие нарушения режимов и схем формообразования [101, 102].

Прогиб профиля в горизонтальной плоскости (саблевидность) (рис. 1.14, схема 1.2; рис. 1.15, б) происходит ввиду следующих причин: неверное положение оси профилирования в горизонтальной плоскости, неравномерный зазор роликового калибра, боковое смещение заготовки на предварительных переходах, саблевидность исходной заготовки (более 3 мм/м), ошибочная схема формообразования несимметричного профиля, неверная настройка правильного устройства. Данный дефект возникает весьма редко при формообразовании симметричных профилей, если соблюдаются схемы и режимы их производства.

Скручивание профиля (рис. 1.14, схема 1.3; рис. 1.15, в) может происходить из-за ошибок в выборе схем формообразования, смещения оси профилирования, неравномерности зазора в роликовых калибрах, отклонений параметров заготовки (ее саблевидности, разнотолщинности или избытка ее ширины при использовании закрытых роликовых калибров), неправильной настройки правильного блока. Наибольшей скрутке подвержены несимметричные профили, хотя в большинстве случаев скрутка может быть устранена соответствующей настройкой правильного устройства. Устранение скрутки реже приводит к потере устойчивости периферийных элементов профиля, чем предотвращение продольного прогиба профиля с помощью правильного устройства. Скрутка является следствием несбалансированности деформационных характеристик подгибаемых полок. В традиционном профилировании предупреждение скрутки профилей отчасти достигается за счет подгибки полок на различные углы, за счет комбинации подгибки и разгибки меньшей по ширине полки, а также за счет поворота сечения профиля относительно оси профилирования [39, 59].

Отклонение размеров сечения профиля от номинальных размеров проявляется в недоформовке профиля по высоте (рис. 1.14, схема 2.1.1; рис. 1.15, г), отклонениях по ширине отбортовки (рис. 1.14, схемы 2.1.2-2.1.3), пружинении (рис. 1.14, схема 2.2; рис. 1.15, д) и отклонениях кривизны зон изгиба (рис. 1.14, схема 2.3; рис. 1.15, е). Недоформовка профиля по высоте связана с заниженной шириной заготовки, неравномерным зазором или раскрытием роликового калибра. Отклонения по ширине профиля часто происходят из-за изменения кривизны зоны изгиба в процессе деформирования, связанного с пружинением. При разгрузке (выходе профиля из калибра очередной пары роликов) возникает уширение профиля, даже в отсутствие значительных отклонений угловгиба.

При традиционном профилировании пружинение является значительным, поэтому к последнему переходу угол подгибки уменьшают, поскольку величина пружинения $\Delta\Theta$ прямо пропорциональна углу подгибки Θ :

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

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

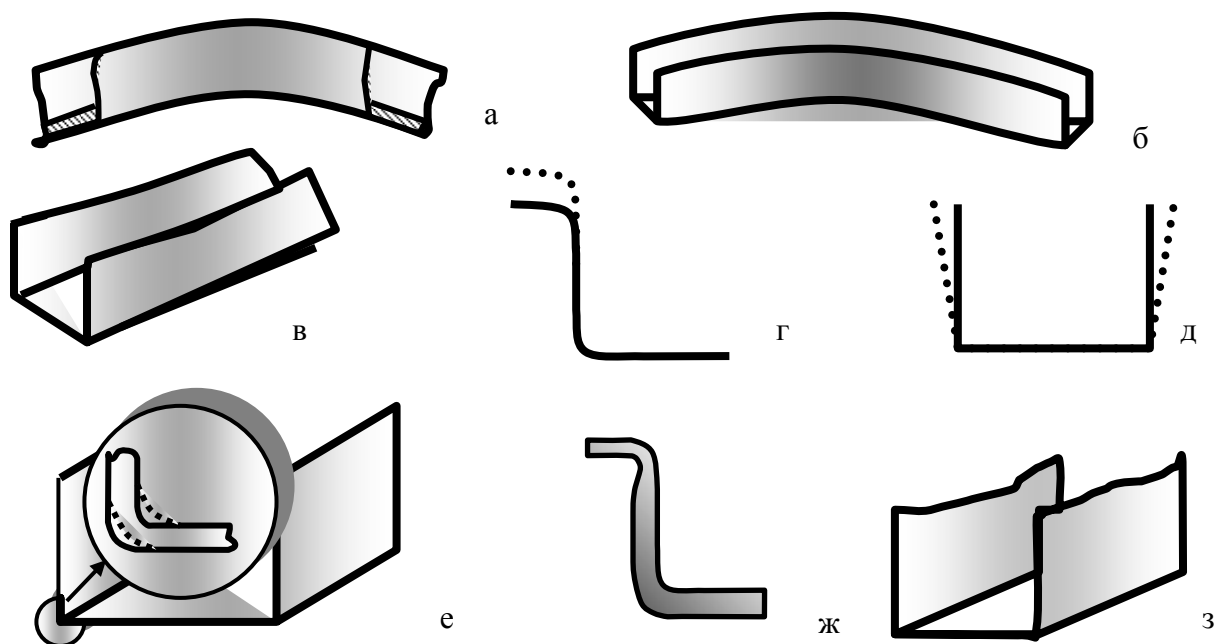


Рис. 1.15. Дефекты гнутых профилей: а – продольная кривизна; б – саблевидность; в – скрутка; г – недоформовка по высоте; д – пружинение; е – отклонение по радиусу; ж – разнотолщинность; з – кромковая волнистость

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

Разнотолщинность (рис. 1.14, схема 2.4; рис. 1.15, ж) – непостоянство толщины материала профиля, обусловлена нестабильными условиями профилирования. Так при горячей прокатке она чаще всего вызывается большим перепадом температур по длине раската, а при холодной прокатке – изменением зазора между валками, колебанием сил прокатки. Разнотолщинность также может стать следствием неудовлетворительного качества профилирующих валков.

Потеря устойчивости элементов готового профиля регламентируется соответствующими нормативными документами и часто является причиной, препятствующей сокращению числа переходов.

Линии Чернова—Людерса (рис. 1.14, схема 3.1) представляют собой следы плоскостей скольжения, выходящие на поверхности деформированной заготовки. Дефекты портят внешний вид, уменьшают точность размеров изготовленных изделий, а иногда приводят к браку.

Кромковая волнистость (рис. 1.14, схема 3.2; рис. 1.15, з) – неплоскостность в виде чередования гребней и впадин, образующихся вследствие неравномерной вытяжки металла по длине и ширине полосы или листа. Это наиболее часто встречающийся дефект при изготовлении тонкостенных широкополоч-

ных профилей. При высокой жесткости подгибаемых полок может иметь место как кромковая волнистость, так и излом полки (рис. 1.14, схема 3.3; рис. 1.16, а). Изломы образуются при местной пластической деформации вследствие резких перегибов и представляют собой неисправимый брак профиля.

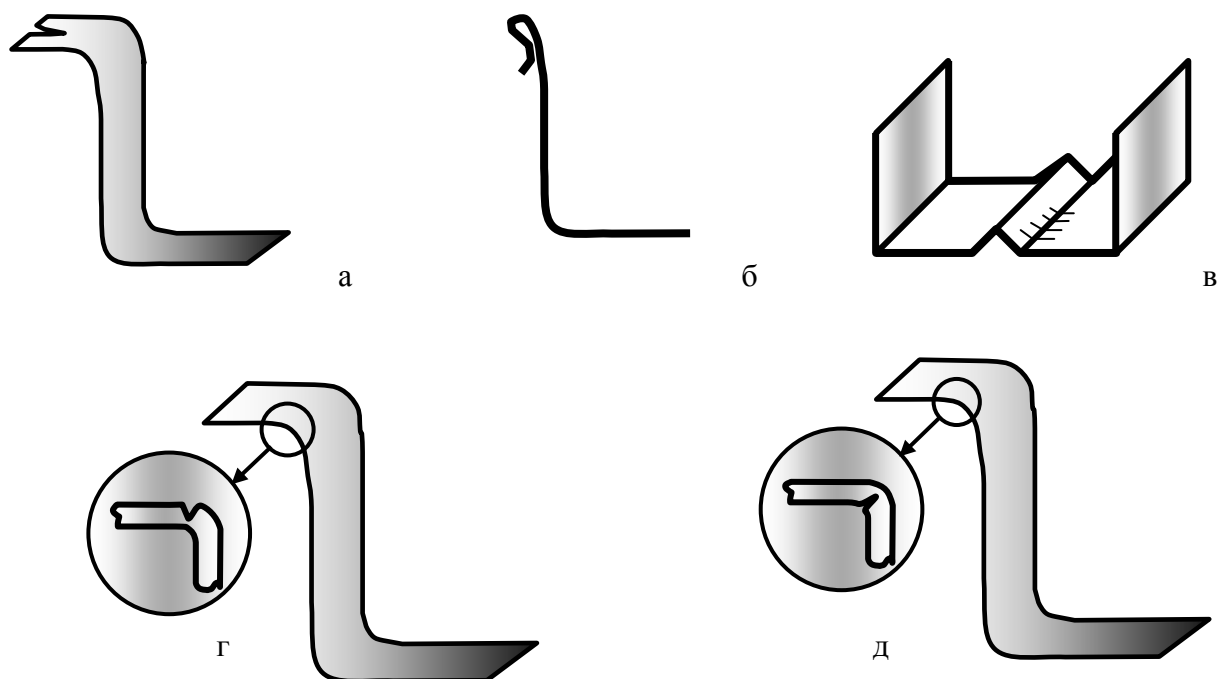


Рис. 1.16. Дефекты гнутых профилей: а – излом полки; б – смятие; в – мелкие складки; г – разрушение наружного контура; д – зажимы

Смятие (рис. 1.14, схема 3.4; рис. 1.16, б) можно отнести к браку профиля. Чаще всего оно возникает при контакте заготовки с буртом ролика.

Причиной мелких складок на внутренней поверхности (рис. 1.14, схема 3.5; рис. 1.16, в) является неблагоприятное сочетание силовых факторов, неравномерный зазор роликового калибра.

Наиболее серьезными дефектами гнутых профилей являются дефекты, связанные с разрушением. Трещины (разрушение наружного контура) (рис. 1.14, схема 4.2.1; рис. 1.16, г) возникают в местах изгиба на наружной поверхности и зачастую приводят к окончательной отбраковке проката. Причины трещинообразования: недостаточная пластичность металла и дефекты его микроструктуры; малые радиусы изгиба при профилировании; наличие рисок или глубоких царапин, совпадающих с наружной поверхностью зоны изгиба. Трещины наиболее часто наблюдаются при профилировании заготовок из труднодеформируемых материалов.

Зажимы (рис. 1.14, схема 4.2.2; рис. 1.16, д) проявляются в виде утолщений на внутреннем контуре при гибке и чаще всего возникают в результате неравномерной деформации полосы в поперечном направлении.

Дефекты поверхности профиля проявляются в виде задиrow, царапин, разрушения покрытия (рис. 1.14, схема 4.1; рис. 1.17). Причиной задиrow и царапин могут быть жесткие схемы формообразования (большие контактные

напряжения), неудовлетворительное качество поверхности формующих роликов, неравномерный зазор в калибре, избыточная ширина заготовки при изготовлении профиля в закрытых калибрах. При изготовлении тонкостенных стальных профилей без покрытия проблем, связанных с указанными поверхностными дефектами, обычно не возникает.

Такой дефект, как неравномерное деформационное упрочнение, связан с изменением механических свойств материала заготовки и обычно сопровождается снижением пластичности отдельных ее участков. Данный вид дефекта является результатом разных обжатий по сторонам раската, разнотолщинности, неравномерного нагрева по ширине заготовки и др.

Такое же неблагоприятное влияние на механические свойства может также оказывать крупнозернистость (рис. 1.14, схема 5.2; рис. 1.18), возникающая при нагреве заготовки выше определенных температур и длительной выдержке.

Представленный классификатор позволяет выявить особенности возникновения дефектов гнутых профилей и подлежит использованию в целях повышения качества профилей с отбортовками, изготавливаемых из листового и рулонного материала.

1.5. Применяемые материалы для производства гнутых профилей

Материалом для изготовления гнутых профилей служат малоуглеродистые и легированные стали, цветные металлы (алюминий) и их различные сплавы. Кроме того, могут быть использованы плакированные или биметаллические материалы (окрашенные, оцинкованные и др.).

Материал, идущий на изготовление гнутых профилей, не должен иметь структуру свободного цементита и резко выраженного предела текучести.

В первом случае возможно появление трещин в местах изгиба полосы, а во втором – рябизны на поверхности готового профиля.

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

1.5.1. Материалы без покрытия

Применительно к профилированию наиболее непритязательны в технологическом отношении низкоуглеродистые стали, где влияние углерода определяется его структурной формой. Небольшие количества разрозненных зерен

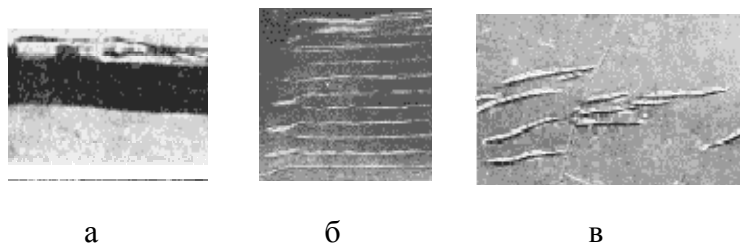


Рис. 1.17. Дефекты гнутых профилей:
а – задиры; б – царапины; в – отслоение покрытия



Рис. 1.18. Крупнозернистая структура металла

цементита и пластинчатого перлита не дают ухудшения пластических свойств, в то время как наличие сетки структурно-свободного цементита может резко снизить пластичность стали (по ГОСТ 9045-80 балл сетки не должен превышать двух – трех) [4]. Параметры твердости стали существенно зависят от содержания азота: чем больше азота, тем больше твердость. Деформируемость в первом приближении оценивается отношением предела текучести к пределу прочности (рекомендуемые значения для профилирования 0,55 – 0,60) или величиной относительного удлинения. Наиболее часто применяемые для производства гнутых профилей марки сталей: Ст2 – Ст6 (спокойные или кипящие), сталь 08кп, сталь 10 кп, сталь 08Ю, сталь 09Г2, для которых состав, механические характеристики, виды поставки и соответствующие стандарты указаны в работе [1]. Влияние химического состава, режимов механической и термической обработок на технологические свойства и прочностные параметры указанных материалов подробно рассмотрено в работах [4]. Отметим, что для приведенных марок сталей относительное удлинение превышает 20%.

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

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

Указанные выше группы материалов обладают к тому же существенной анизотропией свойств, которая влияет не только на характеристики пластичности, но и на силовые параметры процесса.

1.5.2. Материалы с металлическим покрытием

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

В качестве металлического покрытия стальной ленты в России и за рубежом чаще всего применяют цинк для защиты металла от коррозии. Нанесение металлического покрытия на цинковой основе определенной толщины осуществляют горячим или электролитическим способом [4]. Оцинкованная сталь, полученная из горячего расплава, обладает лучшими защитными свойствами, а

покрытие имеет большую адгезию и прочность по сравнению с электролитической сталью, поэтому около 70% поверхностей цинкуют из расплавов.

При интенсивном формообразовании нарушение поверхности оцинкованной заготовки наблюдается при больших контактных напряжениях, а налипание/перенос покрытия на формующие ролики – лишь в случае неудовлетворительного качества покрытия исходной заготовки. При условиях, предвещающих потерю устойчивости элементов профиля, на них появляются линии Чернова-Людерса, ухудшающие потребительские качества последнего.

1.5.3. Материалы с органическим покрытием

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

Из множества характеристик полимерных материалов для процессов профилирования наибольший интерес представляют характеристики конечного полуфабриката – листа или ленты [4]. С точки зрения профилирования наиболее важным из физико-механических свойств покрытия является его эластичность, позволяющая осуществлять изгиб заготовки. Покрытия улучшают деформационную способность металла, в частности, за счет снижения трения заготовки о поверхность инструмента, что дает возможность достижения больших степеней деформации. Для оценки технологичности изготовления того или иного профиля характеристики покрытия должны в обязательном порядке приниматься во внимание.

1.6. Учет факторов процесса профилирования при теоретическом анализе

Теоретическому анализу процессов гибки, лежащих в основе профилирования, посвящено значительное количество работ известных ученых И.П. Ренне [103], Е.А. Попова [104], В.И. Давыдова [105], Р. Хилла [106], Г.Я. Гуна [107], В.В. Соколовского [108], В.В. Колмогорова [109], Ю.М. Арышенского [110], В.И. Ершова [48, 111], А.Д. Матвеева [112], М.Е. Докторовой и И.С. Тришевского [113, 114], Г.В. Проскуракова [115, 116], С.И. Вдовина [117], К.Н. Богояв-

ленского [61], Х. Судзуки и М. Киути [118], Д. Кокадо и Е. Онода [119] и др. В них рассмотрены основные вопросы гибки: исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) и утонения заготовки в зоне изгиба, различные формулировки условий пластичности и учет упрочнения, влияние анизотропии на процессы гибки, пружинение, предельные возможности процесса гибки, вопросы устойчивости при гибке.

Исследованию угловой зоны при обычной гибке посвящены работы [103, 104, 106], в которых определено напряженно-деформированное состояние в зонах растяжения и сжатия при пластическом и упруго-пластическом изгибе.

Изменение толщины заготовки в работе [113] определяется на основе равенства площадей зоны сжатия и зоны растяжения. Изгиб с упрощенным условием пластичности был рассмотрен в статье [103], где показано, что изменение толщины заготовки не зависит от пластических свойств материала, а определяется уравнением движения. В работе [113] изменение толщины определяется для случая гибки с растяжением, а в работе [120] – с торцевым сжатием.

Имеется большое количество работ, в которых рассматриваются вопросы учета упрочнения, анизотропных свойств материала, вопросы пружинения, предельных возможностей [4, 105, 107, 110, 111, 113] при формообразовании угловой зоны профиля. Тем не менее эти весьма полезные результаты обычно не связываются с особенностями схем формообразования, характеристиками сечения профиля, условиями реализации процесса профилирования.

При интенсивном деформировании большое значение для продольных деформаций полок имеет межклетьевое расстояние, которое обычно задано конструкцией профилегибочной машины [39, 50]. Продольные деформации полок влияют на возникновение кромковой волнистости. Кроме того, если межклетьевое расстояние меньше, чем протяженность зоны плавного перехода, то происходит переформовка заготовки, повышающая энергетические затраты, а также ухудшающая условия формообразования [87]. Определение протяженности зоны плавного перехода важно как для разработки технологии, так и для проектирования профилегибочного оборудования [4, 87].

Обзорная статья М. Киути [121] затрагивает как вопросы оптимизации технологии, так и проблемы конструкции оборудования и систем контроля при профилировании. Следует отметить указание авторов на возможность появления на поверхности профиля линий Чернова–Людерса, которые действительно возникают при формообразовании профилей с элементами жесткости из оцинкованной стали при жесткой схеме формообразования.

В работе [121] обсуждаются также вопросы минимального числа переходов при профилировании. Этот вопрос решается обычно на основании опыта разработчиков и часто указывается широкий диапазон значений числа переходов для профиля данного типа, что осложняет формализацию процесса проектирования технологического оснащения.

1.7. Выводы

Приведенный анализ показывает, что применение гнутых профилей с отбортовками может обеспечить конструктивно-технологическое совершенствование, быструю сборку, надежность, мобильность и долгий срок эксплуатации конструкций, используемых во многих отраслях народного хозяйства.

Выявлено, что интенсивное деформирование гнутых профилей с отбортовками в роликах предпочтительнее методов гибки в кромкогибочных устройствах, штампах, инструментальных фильерах, а также в роликах при традиционном профилировании, так как обеспечивает более широкие технологические возможности и высокое качества профиля.

Установлено, что наиболее приемлемым оборудованием для реализации технологии МИД являются профилировочные станки ОАО «Ульяновский НИ-АТ» и ООО «НПО «ИДМ», поскольку применение оборудования для ТП нецелесообразно для мелкосерийного изготовления профилей из-за высокой стоимости, значительных габаритных размеров, большого количества оснастки.

Показано, что при формообразовании профилей с отбортовками в роликах наиболее серьезными являются дефекты изменения размеров сечения профиля, потери устойчивости его элементов и нарушения покрытия.

Анализ теоретических работ в предметной области показал, что при изготовлении профилей с отбортовками актуальными остаются вопросы схем формообразования и связанное с ними НДС подгибаемых полок и угловых зон, обеспечения размерной точности сечения и протяженности зоны плавного перехода. Решение этих вопросов позволит совершенствовать существующие процедуры разработки и отладки технологии, повысить качество профилей.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ С ОТБОРТОВКАМИ

В подразделе 1.4 были рассмотрены основные дефекты заготовки при отработке технологии изготовления профилей с отбортовками. Неустраняемые дефекты (утонение заготовки, линии Чернова-Людерса, кромковая волнистость и излом полки) являются наиболее серьезными и часто повторяющимся при отработке технологии формообразования профиля в роликах (60 – 80% случаев).

Зависимость появления этих дефектов от параметров оборудования, числа переходов, конфигурации калибров роликов и настроечных параметров технологического процесса предполагает построение математических моделей с целью оптимизации процесса профилирования. Эти вопросы рассматриваются в данном разделе. Типоразмер профиля и параметры отбортовки во многом определяют возможность появления того или иного из указанных дефектов, поэтому классификация профилей с отбортовками необходима для совершенствования технологии их изготовления и выработки рекомендаций по уточнению предмета исследования.

2.1. Классификация профилей с отбортовками [122]

При разработке технологических процессов изготовления гнутых профилей с отбортовками возникает ряд задач, от правильного решения которых зависит точность и качество профилей, а также экономичность их изготовления. Общая конфигурация профиля влияет в целом на технологию его изготовления и на формовку отбортовки, в частности. В связи с этим возникает необходимость разработки четкого классификатора профилей с данным видом элементов жесткости. На рис. 2.1 представлен обобщенный классификатор гнутых профилей с отбортовками [122, 123].

Разделение изделий по конструктивному признаку (рис. 2.1, схема 1) основано на выделении функций, выполняемых профилем в той или иной конструкции. Несущий элемент – плоский участок гнутого профиля, служащий опорой периферийному элементу жесткости – отбортовке.

В зависимости от его расположения периферийного элемента профили с отбортовками можно разделить на профили с горизонтальным (рис. 2.1, схема 2.1; рис. 2.2, а), наклонным (рис. 2.1, схема 2.2; рис. 2.2, б) и вертикальным (рис. 2.1, схема 2.3; рис. 2.2, в) несущим элементом.

В зависимости от угла наклона отбортовки по отношению к несущему элементу профили можно разделить на профили с неполной (рис. 2.1, схема 3.1; рис. 2.2, г), полной отбортовкой (рис. 2.1, схема 3.2; рис. 2.2д) и отбортовкой с поднутрием (рис. 2.1, схема 3.3; рис. 2.2, е).

Характеристики исходного материала существенно влияют на технологию, в связи с чем их можно разделить на различные стали (в том числе нержавеющей, жаропрочные), сплавы (Д16, АМг-6, В95, 1420, 1430, ОТ4-1, АБМ1 и др.) и материалы с покрытием (оцинкованные, окрашенные, с полимерным покрытием) [124, 25].

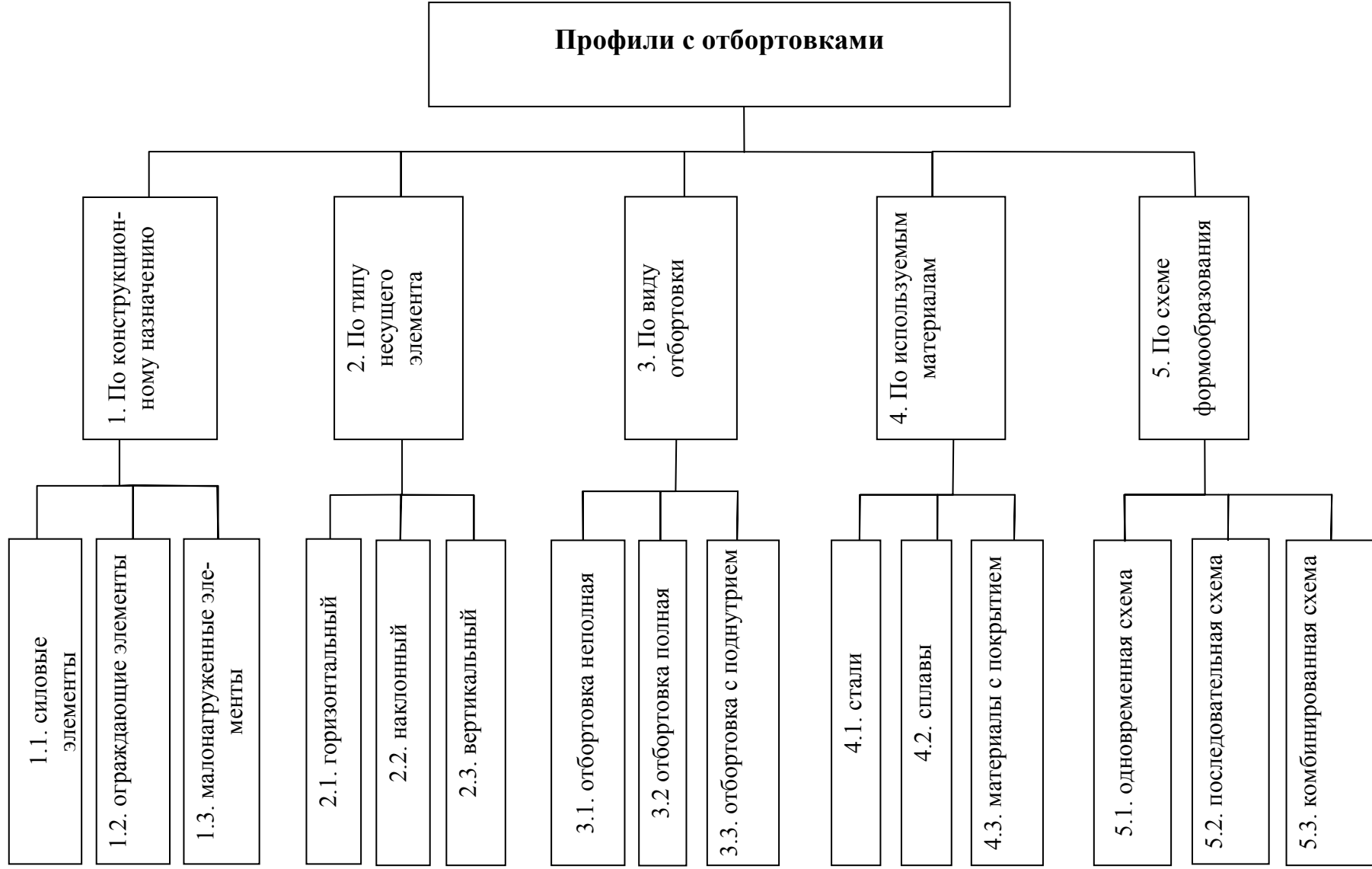


Рис.2.1. Классификация профилей с отбортовками

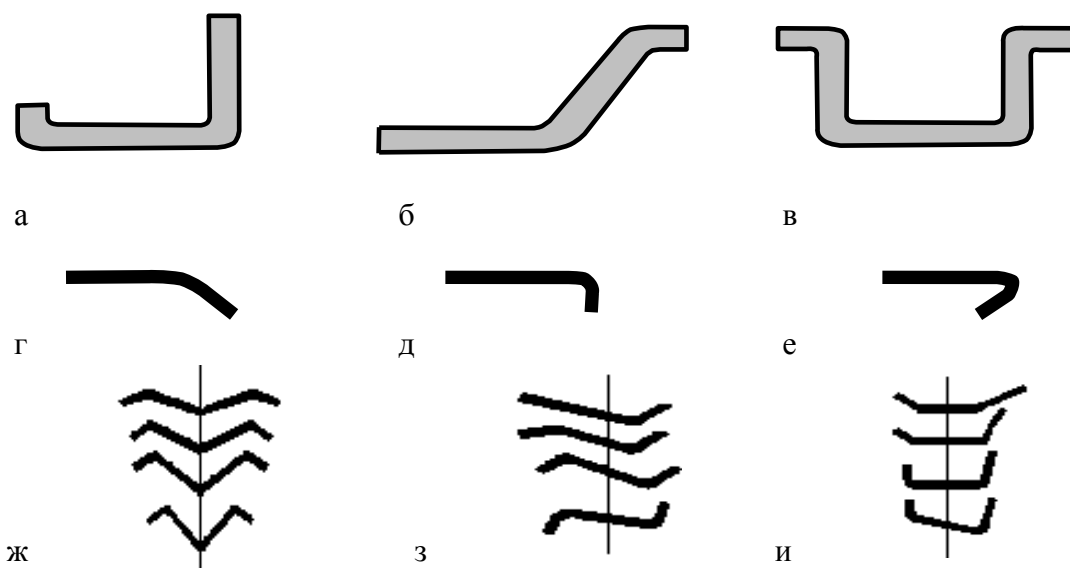


Рис. 2.2. Примеры профилей с отбортовками и виды схем формообразования:
а – профиль с горизонтальным несущим элементом; б – профиль с наклонным несущим элементом; в – профиль с вертикальным несущим элементом; г – отбортовка неполная; д – отбортовка полная; е – отбортовка с поднутрием; ж – одновременная схема формообразования; з – последовательная схема; и – комбинированная схема

По схеме формообразования профили можно разделить на изделия с одновременной формовкой всех элементов (рис. 2.1, схема 5.1; рис. 2.2, ж). Сюда относятся все профили с одной зоной изгиба (например, уголки), а также все симметричные профили с двумя, тремя и четырьмя местами (зонами) изгиба — швеллеры, корытные профили [87].

При последовательной схеме (рис. 2.1, схема 5.2; рис. 2.2, з) вначале формируются крайние участки профиля, а затем — средние или наоборот. Примерами могут служить гофрированные и зетовые профили.

Комбинированная схема (рис. 2.1, схема 5.1; рис. 2.2, и) предусматривает вначале последовательную формовку профиля, а затем — одновременную или наоборот [87].

Представленный классификатор, сформированный по конструктивно-технологическим признакам, позволяет выявить особенности формообразования профилей с отбортовками и может быть использован в методике разработки технологии с целью учета общей конфигурации профиля.

2.2. Расчет развертки сечения профиля и предварительный расчет ширины заготовки [125]

В процессе изготовления большинства профилей в местах изгиба металл полосы утоняется, тангенциальные напряжения, возникающие при гибке, вызывают течение металла в тангенциальном направлении, что приводит к увеличению ширины профилируемой полосы, и, следовательно, к отклонениям геометрических размеров профиля.

Для получения качественных профилей с предельными отклонениями, не превышающими допустимых величин, предусмотренных действующими стан-

дартами, ширина заготовки определяется с учетом приращения ширины участков изгиба в процессе формоизменения полосы в формующих валках.

Точное определение размеров исходной заготовки может включать в себя несколько стадий: 1. Подсчет размеров заготовки по средней линии (развертке) готового профиля; 2. Корректировка размеров заготовки при построении технологического процесса в соответствии с перераспределением (перетеканием) металла в соседние зоны и его утонением (или утолщением) – гибка на малый радиус, вытяжка, формовка, гибка со сжатием (стесненный изгиб); 3. Окончательная корректировка размеров заготовки при отработке профиля на станке в связи с фактическим течением металла при деформировании.

Ширину заготовки можно определить аналитическими, графоаналитическими и графическими методами. Выбор метода расчета зависит от сложности сечения профиля и необходимой его точности. Как правило, при определении ширины заготовки аналитическим методом сечение профиля делят на элементарные участки: прямолинейные и радиусные места.

Определение размеров плоских заготовок, подвергаемых изгибу, основано на равенстве длины заготовки длине нейтрального слоя изогнутой детали и сводится к определению положения длины нейтрального слоя в зависимости от относительного радиуса изгиба – « r/S ». Различают два основных случая гибки [47, 51, 125]: по кривой определенного радиуса (при $r > 0,38$); под углом без закругления (при $r < 0,38$).

Длина плоской заготовки развертки по кривой определенного радиуса определяется по формуле [125]:

$$L = \sum l_{\text{прям}} + \sum l_{\text{кр}} = (l_1 + l_2 + \dots + l_n) + \sum \left(\frac{\pi \cdot \alpha^0}{180^0} (r + x_0 \cdot S) \right), \quad (2.1)$$

где l – длины прямолинейных участков гнутой детали, мм; α – угол изогнутого участка ($\alpha = 180^\circ - \varphi^\circ$), град.; $\alpha^0 = \varphi^0$ – только при $\varphi = 90^\circ$; φ – угол гибки, град.; r – радиус закругления детали, мм; x_0 – коэффициент, определяющий положение нейтрального слоя; $x_0 = f(r/s)$.

При гибке под углом 90° длина развертки определяется по формуле:

$$L = (l_1 + l_2 + \dots + l_n) + \sum \left(\frac{\pi}{2} (r + x_0 \cdot S) \right) = (l_1 + l_2 + \dots + l_n) + \sum (1,57 \cdot (r + x_0 \cdot S)).$$

Длина плоской заготовки (развертки) при гибке под углом без закругления (при $r < 0,38$) определяется предварительно, исходя из неизменности объема металла заготовки до гибки и после гибки, с учетом поправок на утонение.

В этом случае:

$$L = \sum l_{\text{прям}} + \sum l_{\text{кр}} = (l_1 + l_2 + \dots + l_n) + \sum (n \cdot 0,5 \cdot S_n),$$

где n – количество углов гибки (при $r < 0,38$).

Возможен и другой подход, в котором радиус кривизны нейтрального слоя деформаций определяют по формуле:

$$\rho = \sqrt{R_n r},$$

где R_n – наружный радиус закругления, а ширину каждого участка закругления длиной $l_{кр}$ уменьшают на величину приращения ширины заготовки вследствие поперечной вытяжки по формуле [113]:

$$\Delta l = 0,00074 R_{срi} \frac{(13,1 + S)}{\sqrt[3]{r^2}} \left(l \frac{S}{r} \right)^{1/2} \alpha_i^{2/3},$$

где $R_{срi}$ – средний радиус изгиба.

Следует иметь в виду, что приведенные формулы для расчета ширины заготовки являются весьма приближенными, поскольку изменение толщины заготовки на криволинейных участках весомерно зависит от схемы формообразования профиля. Уточненный расчет ширины заготовки, обеспечивающий качество изготавливаемого профиля, является предметом исследования в последующих разделах работы.

2.3. Исследование напряженно-деформированного состояния в зонах изгиба при различном нагружении [127]

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 применяется схема плоской деформации, материал считается изотропным и несжимаемым, эффектом Баушингера пренебрегаем, компоненты тензора напряжений зависят только от одной из координат. Другие допущения будут формироваться по мере следования соответствующих задач.

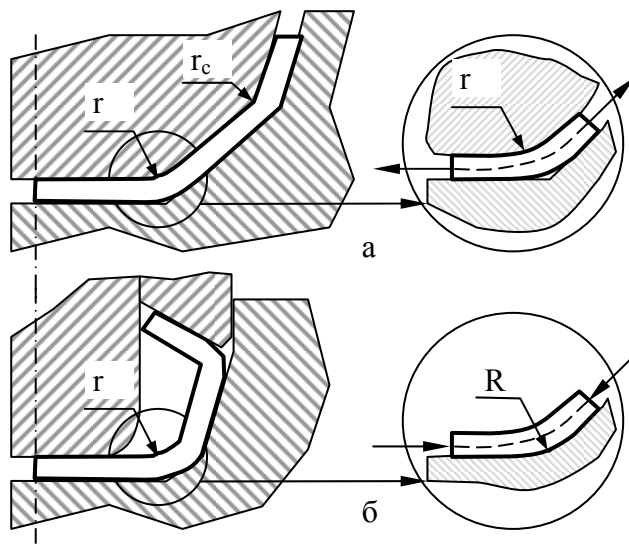


Рис. 2.3. Формовка угловых зон: а – на первых переходах; б – на последних переходах

При формовке угловых зон на первых переходах в открытых калибрах схема внешних воздействий близка к схеме гибки с растяжением (рис. 2.3,а), а на последних переходах, где осуществляется обжим заготовки по наружному контуру, схема внешних воздействий близка к схеме гибки с торцевым сжатием (рис. 2.3,б). В первом случае заготовка, как правило, получает утонение, а во втором – утолщение. При интенсивном деформировании формовку заготовки (даже на первых переходах) осуществляют в закрытых калибрах.

2.3.1. Предварительные переходы – схема с растяжением [128]

На предварительных переходах, где формовка осуществляется по открытой схеме со 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 донной части профиля. Однако схема растяжения присуща и углам, примыкающим к отбортовкам.

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 $2N \cos[(\pi - \alpha)/2]$, а проекция распределенной нагрузки определяется интегралом:

$$\int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} p r \cos \theta \cdot d\theta, \quad (2.2)$$

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

Приравнивая величину растягивающей силы и силы, определяемой интегралом (2.2), получим:

$$-2N \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right) = \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} p \cdot r \cdot \cos \theta d\theta. \quad (2.3)$$

Проводя несложные преобразования левой и правой части уравнения (2.3), получим:

$$N = -p \cdot r. \quad (2.4)$$

Для вычисления смещения нейтрального слоя и последующего определения изменения толщины заготовки в угловой зоне следует рассмотреть ее напряженно-деформированное состояние.

Применим инженерный метод [129] для определения напряжений и положения нейтрального слоя по напряжениям. Уравнение равновесия угловой зоны имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \quad (2.5)$$

где $\sigma_\rho, \sigma_\theta$ – радиальное и окружное напряжение соответственно; ρ – текущее значение радиуса.

Упрощенное условие пластичности можно записать в виде:

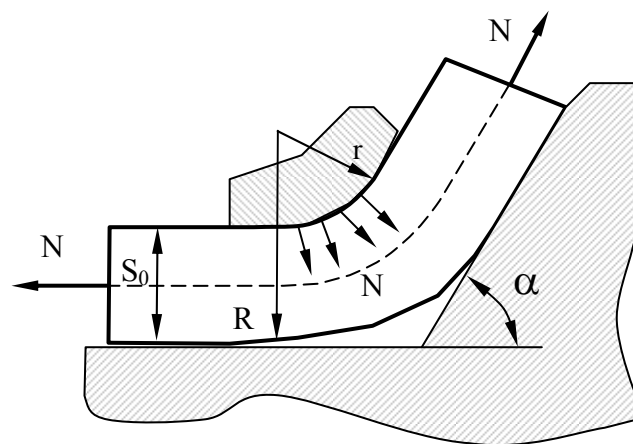


Рис. 2.4. Схема приложения сил в угловой зоне на предварительных переходах

$$\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = \sigma_{\tau}^* \text{ (зона сжатия)}, \quad (2.6)$$

$$\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = -\sigma_{\tau}^* \text{ (зона растяжения)}, \quad (2.7)$$

где σ_{τ}^* – модифицированный предел текучести материала заготовки.

Граничные условия имеют вид:

$$\sigma_{\rho}(\rho = r) = -p \text{ (зона сжатия)}, \quad (2.8)$$

$$\sigma_{\rho}(\rho = R) = 0 \text{ (зона растяжения)}, \quad (2.9)$$

где R – радиус кривизны наружного контура зоны изгиба.

Используя соотношения (2.5), (2.6) и (2.8), получим распределение радиальных напряжений в сжатой зоне:

$$\sigma_{\rho}^{pc} = \sigma_{\tau}^* \cdot \ln \frac{r}{\rho} - p. \quad (2.10)$$

Интегрируя уравнение (2.5) с использованием условий (2.7) и (2.9), получим решение для зоны растяжения:

$$\sigma_{\rho}^{pp} = \sigma_{\tau}^* \cdot \ln \frac{\rho}{R}. \quad (2.11)$$

«Сшивая» решения (2.10) и (2.11), получим значение радиуса кривизны нейтрального слоя:

$$\rho_{\text{н}} = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(-\frac{p}{2\sigma_{\tau}^*}\right). \quad (2.12)$$

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:

$$|N| = \frac{\sigma_{\tau}^* \cdot s_0^2}{2(r_c + s_0/2)}, \quad (2.13)$$

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

Из соотношений (2.4) и (2.13) получим формулу для приближенного вычисления давления:

$$p = \frac{\sigma_{\tau}^* \cdot s_0^2}{2r(r_c + s_0/2)}. \quad (2.14)$$

Из формулы (2.12) с учетом зависимости (2.14) получим значение радиуса кривизны нейтрального слоя:

$$\rho_{\text{н}}^p = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(-\frac{s_0^2}{4r(r_c + s_0/2)}\right). \quad (2.15)$$

Отметим, что положение нейтрального слоя определяется исключительно геометрическими характеристиками заготовки и не зависит от ее механических

свойств. Конечно, следует иметь в виду, что входящие в формулу (2.15) радиусы r и r_c определяются выбранной технологией профилирования, точнее, схемой формообразования.

2.3.2. Последние переходы – схема со сжатием [130]

Рассмотрим далее изгиб с торцевым сжатием, характерный для последних переходов, где осуществляется обжим заготовки по наружной поверхности и в некоторых переходах с приложением сил к торцам отбортовок. Для выявления положения нейтрального слоя напряжений, используемого далее при вычислении изменения толщины зоны изгиба, применим, как и ранее, решение уравнения равновесия (2.5) с условием пластичности (2.7).

Граничные условия для случая посадки наружного контура зоны изгиба на инструмент формулируются в виде:

$$\sigma_\rho(\rho = r) = 0 \text{ (зона сжатия),} \quad (2.16)$$

$$\sigma_\rho(\rho = R) = -q \text{ (зона растяжения),} \quad (2.17)$$

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

Из соотношений (2.16) и (2.17) получаем значение радиального напряжения для сжатой зоны:

$$\sigma_\rho^{cc} = -\sigma_\tau^* \cdot \ln \frac{r}{\rho}. \quad (2.18)$$

Используя формулы (2.5), (2.7) и (2.17), получим также радиальное напряжение для зоны растяжения:

$$\sigma_\rho^{cp} = -\sigma_\tau^* \cdot \ln \frac{R}{\rho} - q. \quad (2.19)$$

«Сшивание» решений (2.18) и (2.19) дает формулу для определения радиуса кривизны нейтрального слоя напряжений:

$$\rho_n = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(\frac{q}{2\sigma_\tau^*}\right). \quad (2.20)$$

Как и в случае растяжения, связь погонной силы торцевого сжатия T и давления инструмента на заготовку по наружному контуру зоны изгиба дается формулой:

$$|T| = qR. \quad (2.21)$$

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

$$\frac{\sigma_\tau^* \cdot s_0^2}{4} = rT', \quad (2.22)$$

где T' – сила подгибки отбортовки.

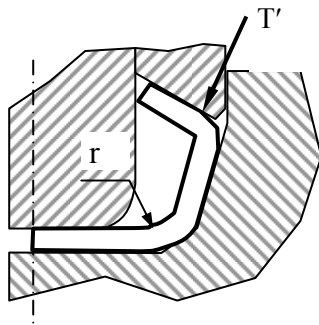


Рис. 2.5. Схема обжима заготовки в роликах

Отметим, что сила в формуле (2.22) дает минимальное значение реальной силы торцового поджатия T . Из рис. 2.5 видно, что при контакте торца заготовки с верхним роликом часть эффективной силы, осуществляющей подгибку полки, 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 подгибаемой полке. Так, действующая сила торцового поджатия будет представлена только некоторой составляющей T . Из соотношений (2.21) и (2.22) давление по наружной поверхности зоны изгиба определяется формулой:

$$q = \frac{\sigma_{\tau}^* \cdot s_0^2}{4rR}. \quad (2.23)$$

Подставляя значение q из формулы (2.23) в соотношение (2.20), получим зависимость для расчета положения нейтрального слоя напряжений при обжиме заготовки в последних переходах:

$$\rho_{\text{н}}^c = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(\frac{s_0^2}{4rR}\right). \quad (2.24)$$

Значение нейтрального слоя напряжений в соответствии с формулой (2.24) подлежит использованию при расчете изменения толщины заготовки.

2.3.3. Расчет скоростей перемещений и изменения толщины заготовки в зонах изгиба [131]

Для определения изменения толщины зоны изгиба обратимся к скоростям и деформациям, сопровождающим процесс формообразования заготовки. Согласно работам [106, 108], скорости перемещения материала в радиальном и окружном направлениях соответственно могут быть представлены зависимостями:

$$u = -\frac{1}{2\alpha} \left(\rho + \frac{\rho_{\text{н}}^2}{\rho} \right), \quad (2.25)$$

$$v = \rho \frac{\theta}{\alpha}, \quad (2.26)$$

где α – суммарный угол подгибки; ρ , θ – 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:

$$\dot{\epsilon}_{\rho} = \frac{\partial u}{\partial \rho}, \quad (2.27)$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + u \right), \quad (2.28)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\rho\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial \rho} - \frac{v}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right). \quad (2.29)$$

Подстановка скоростей из формул (2.25) и (2.26) в определения (2.27) – (2.29) приводит к следующему результату:

$$\dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{1}{2\alpha} \left(1 - \frac{\rho_H^2}{\rho^2} \right), \quad (2.30)$$

$$\dot{\varepsilon}_\rho = \frac{1}{2\alpha} \left(1 - \frac{\rho_H^2}{\rho^2} \right), \quad (2.31)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\rho\theta} = 0. \quad (2.32)$$

Из формул (2.30) – (2.32) видно, $\dot{\varepsilon}_\rho, \dot{\varepsilon}_\theta$ что являются главными скоростями деформации и, кроме того, выполняется условие несжимаемости материала заготовки. Следовательно, значения скоростей (2.25), (2.26) 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 (2.25) можно представить в виде:

$$\Delta\rho = -\frac{1}{2\alpha} \left(\rho + \frac{\rho_H^2}{\rho} \right) \cdot \Delta\alpha. \quad (2.33)$$

Взяв разность виртуальных приращений наружного и внутреннего радиусов на основании формулы (2.31) и отнеся ее к толщине заготовки, получим:

$$\frac{\Delta s}{s_0} = -\frac{\Delta\alpha}{2\alpha} \left(1 - \exp\left(\frac{\eta}{\sigma_T^*} \right) \right), \quad (2.34)$$

где η принимает значение p в случае растяжения и q – в случае сжатия.

Формулу (2.34) можно переписать для указанных двух случаев с учетом зависимостей (2.15) и (2.24) в следующей форме:

$$\frac{\Delta s}{s_0} = -\frac{\Delta\alpha}{2\alpha} \left(1 - \exp\left(\frac{s_0^2}{4r(r_c + s_0/2)} \right) \right), \quad (2.35)$$

$$\frac{\Delta s}{s_0} = -\frac{\Delta\alpha}{2\alpha} \left(1 - \exp\left(\frac{s_0^2}{4rR} \right) \right). \quad (2.36)$$

Для расчета утонения или утолщения, например, для k -го перехода, согласно формулам (2.35) и (2.36) надлежит вводить обозначения:

$$\alpha = \alpha_k, \Delta\alpha = \alpha_k - \alpha_{k-1},$$

где α_{k-1} , α_k – углы подгибки на предшествующем и текущем переходах соответственно.

На рис. 2.6 приведен график, выполненный на основе зависимости (2.35), а на рис. 2.7 – график, выполненный на основе зависимости (2.36).

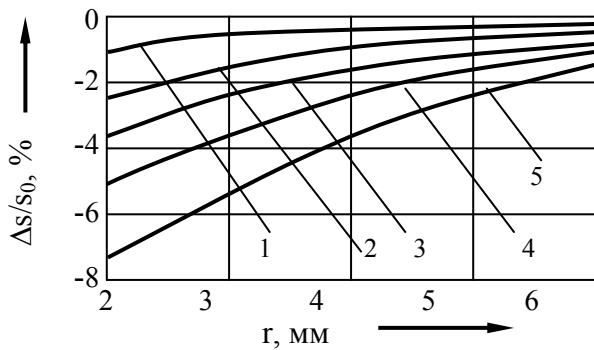


Рис. 2.6. Зависимость утонения от внутреннего радиуса и угла подгибки: 1, 2, 3, 4, 5 – $\Delta\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ соответственно

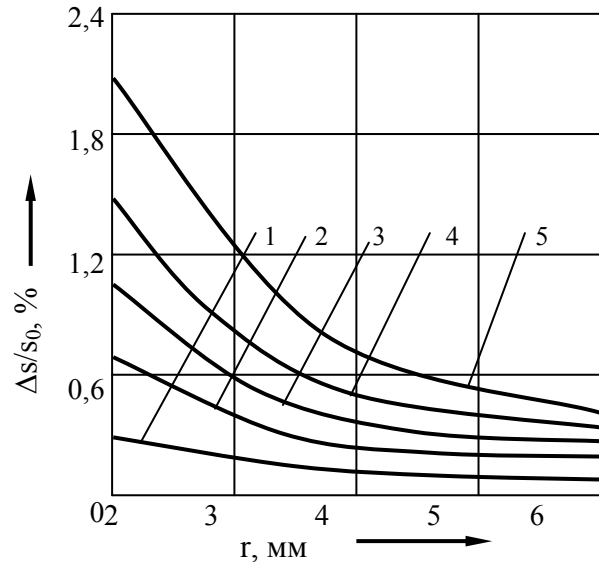


Рис. 2.7. Зависимость утолщения от внутреннего радиуса и угла подгибки: 1, 2, 3, 4, 5 – $\Delta\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ соответственно

Разработанная модель дает весьма близкие результаты к экспериментальным данным по утонению угловых зон на первых переходах при традиционном профилировании, где среднее утонение составляет 2 – 3%, хотя формообразование МИД и ТП существенно различаются. Особенность деформирования заготовки при МИД в первом переходе обусловлена тем, что здесь происходит монотонное изменение радиуса ее кривизны от бесконечности до конечного значения на готовом профиле. В этом случае значительное утонение заготовки обусловлено схемой деформирования, большим углом подгибки и отсутствием предварительного упрочнения угловых зон. При интенсивном деформировании изменение радиусов на последующих переходах незначительно в отличие от традиционного профилирования, при котором радиусы кривизны участков будущих угловых зон изменяются монотонно.

Таким образом, разработанная модель изменения толщины криволинейных участков заготовки в зависимости от расклада силовых факторов устанавливает тенденцию к увеличению утонения или утолщения с уменьшением радиуса изгиба и с увеличением угла подгибки. Уточненный расчет ширины заготовки по разработанной модели позволяет избежать ошибок при разработке технологического оснащения, сократить сроки и затраты на освоение технологии, повысить качество профилей за счет предотвращения потери устойчивости подгибаемых элементов.

2.4. Исследование зоны плавного перехода [132, 133]

Основной особенностью МИД является одновременная формовка всех элементов профиля, что позволяет существенно уменьшить число переходов по сравнению с традиционным профилированием. Одним из существенных ограничений этой технологии является переформовка заготовки из-за больших углов подгибки элементов, при которых длина зоны плавного перехода (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.

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

Рассмотрим подгибаемую полку приведенных размеров, смежную с дном профиля (рис.2.8) на одном из технологических переходов, опустив индексацию переходов. Будем считать, что в данном переходе (скажем, k -м) угол подгибки равен θ_k , а в межклетьевом пространстве текущий угол подгибки является функцией $\theta(x_2)$. При этом следует иметь в виду, что k ($k-1$)-му 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:

$$x_1 - \frac{C}{2} = v \cdot \cos \theta(u), \quad x_2 = u, \quad x_3 = v \cdot \sin \theta(u), \quad (2.37)$$

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

Вычислим предварительно деформации полки при подгибке, для чего найдем коэффициенты первой квадратичной формы ее срединной поверхности, задаваемой уравнениями (2.37):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial u} = 1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial u} \right)^2; \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 0; \quad G = \frac{\partial x_i}{\partial v} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 1, \quad (2.38)$$

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

Длина дуги dS в криволинейной системе координат дается выражением:

$$dS = \sqrt{E \cdot (du)^2 + 2F \cdot du \cdot dv + G \cdot (dv)^2}. \quad (2.39)$$

Продольная деформация e_u для точек, равноудаленных от зоны изгиба, с учетом формул (2.38) – (2.39) определяется соотношением ($dv = 0$):

$$e_u = \ln\left(\frac{dS|_{dv=0}}{du}\right) = \ln(\sqrt{E}) = \frac{1}{2} \cdot \ln E. \quad (2.40)$$

Логарифмическая деформация e_v в направлении координаты v с учетом соотношений (2.38) – (2.39) вычисляется по формуле:

$$e_v = \ln\left(\frac{dS|_{du=0}}{dv}\right) = \ln(\sqrt{G}) = 0. \quad (2.41)$$

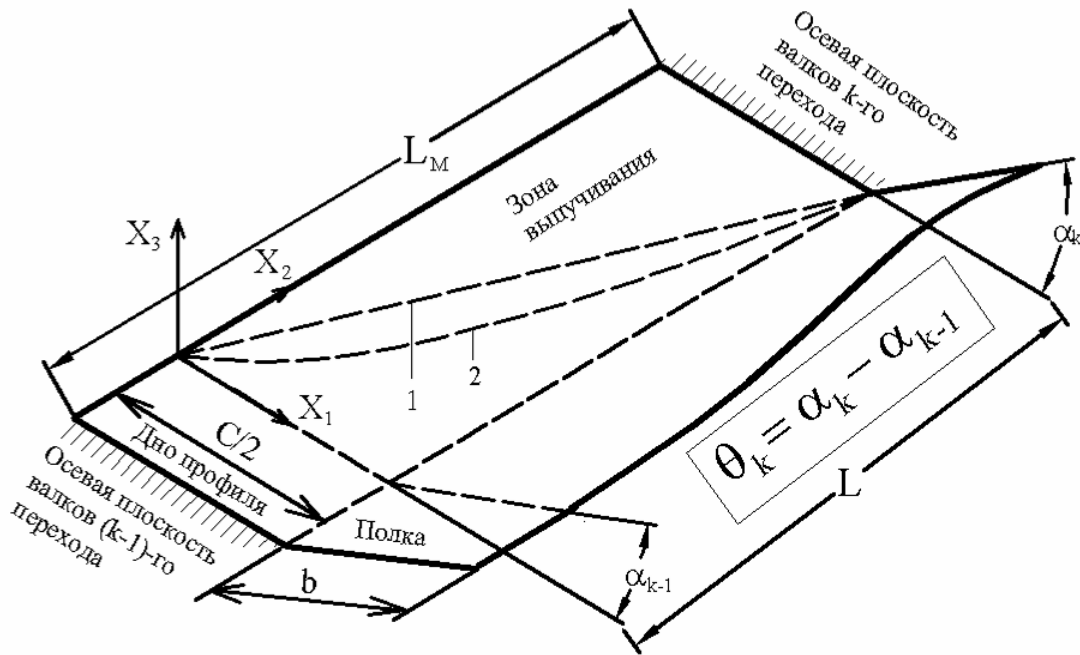


Рис.2.8. Геометрия ЗПП и расположение локальной системы координат:

- 1 – аппроксимация реальной границы пластической области;
- 2 – реальная граница пластической области

Учитывая допущение о несжимаемости материала, из формул (2.40) и (2.41) получаем формулу для определения деформации по толщине полки:

$$e_n = -e_u - e_v = -e_u. \quad (2.42)$$

Интенсивность деформаций e_i с учетом формулы (2.42) можно найти:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial\theta(u)}{\partial u}\right)^2\right). \quad (2.43)$$

Удельную работу деформации полки A_n^{y0} с учетом степенного упрочнения можно получить интегрированием приращения удельной работы:

$$A_n^{y0} = \int \sigma_i \cdot de_i = \frac{1}{m+1} \cdot A \cdot e_i^{m+1} \approx \frac{A}{m+1} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{\partial\theta(u)}{\partial u}\right)^2\right]^{m+1}, \quad (2.44)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; A , m – параметры упрочнения; e_i – интенсивность деформаций, определяемая формулой (2.43).

Для вычисления удельной работы, связанной с формированием угловой зоны, следует сделать некоторые предварительные замечания. При использовании метода интенсивного деформирования схема формовки предусматривает постоянную величину радиуса зон изгиба 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: $\alpha \cdot \rho \cdot d\rho = \alpha \cdot \rho_c \cdot d\rho_c$, где $d\rho$, $d\rho_c$ – приращения радиусов кривизны вблизи произвольной точки и вблизи срединного слоя соответственно.

Координаты произвольной точки угловой зоны в межклетьевом пространстве задаются следующими соотношениями (рис. 2.9):

$$x_1 - \frac{C}{2} = \rho \cdot \sin\left(\frac{\theta(u)}{2} + \gamma\right) - \rho_c \cdot \sin\left(\frac{\theta(u)}{2}\right); \quad x_2 = u; \quad x_3 = \rho_c - \rho \cdot \cos\left(\frac{\theta(u)}{2}\right), \quad (2.45)$$

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 (2.45):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial \rho} = 1, \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} = \rho \cdot \sin(\theta + 2\gamma), \quad G = \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} = \rho^2. \quad (2.46)$$

Длина дуги для этого случая определяется формулой:

$$dS = \sqrt{E \cdot (d\rho)^2 + 2 \cdot F \cdot d\rho \cdot d\gamma + G(d\gamma)^2}. \quad (2.47)$$

Окружные логарифмические деформации с использованием зависимостей (2.46) и (2.47) вычисляются так:

$$e_\gamma = \ln\left(\frac{dS|_{d\rho=0}}{d\gamma \cdot \rho_c}\right) = \ln\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right), \quad (2.48)$$

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

$$e_\rho = \ln\left(\frac{dS|_{d\gamma=0}}{d\rho_c}\right) = \ln\left(\frac{\sqrt{(d\rho)^2 \cdot \rho_c}}{\rho \cdot d\rho}\right) = \ln\left(\frac{\rho_c}{\rho}\right). \quad (2.49)$$

Из формул (2.48) и (2.49) следует, что

$$e_\rho = -e_\gamma. \quad (2.50)$$

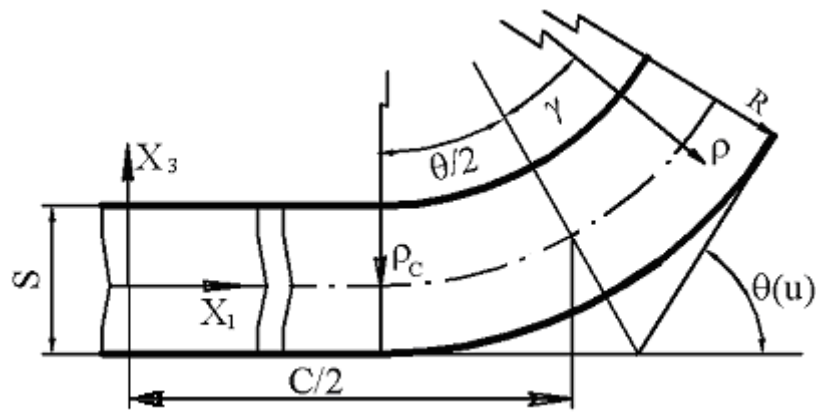


Рис. 2.9. Параметры угловой зоны

Принимая во внимание первое допущение и формулу (2.50), можно констатировать, что для угловой зоны условие несжимаемости также выполняется.

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

$$A_{yz}^{y\delta} = \frac{A}{m+1} \cdot e_i^{m+1} \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \ln \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right) \right)^{m+1}. \quad (2.51)$$

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.2.8 показана 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:

$$A_{\delta}^{y\delta} = \frac{A}{m+1} \cdot e_{np}^{m+1}, \quad (2.52)$$

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 (2.44), полученной с учетом разложения в ряд Тейлора логарифмической функции (2.43) с удержанием члена первого порядка малости:

$$A_n^{полн} = \int_0^L \int_0^b \int_0^S A_n^{y\delta} dS \cdot dv \cdot du = W \int_0^L \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} du, \quad (2.53)$$

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

В формуле (2.53) величина W дается следующей формулой:

$$W = \frac{A \cdot S \cdot b^{2m+3}}{(m+1)(2m+3)} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{m+1}. \quad (2.54)$$

Полная работа пластического деформирования угловой зоны вычисляется с использованием формулы (2.51):

$$A_{yz}^{полн} = 2 \int_0^b \int_{\rho_c}^R A_{yz}^{y\theta} \cdot \rho \cdot d\rho \cdot du = \frac{2A}{m+1} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{m+1} \cdot \int_{\rho_c}^R \left[\ln\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right) \right]^{m+1} \cdot \rho \cdot d\rho \cdot \int_0^L \theta(u) du, \quad (2.55)$$

где R – радиус кривизны наружного контура зоны изгиба.

В формуле (2.55) подынтегральное выражение, содержащее логарифм, может быть разложено в ряд Тейлора с удержанием первого члена ряда:

$$\ln \sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^i}{i \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^i} \right] \approx \frac{\rho - \rho_c}{\rho}. \quad (2.56)$$

Анализ соотношения (2.56) при $\rho = R$ 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 (при $R \approx \rho_c + S/2$):

$$\int_{\rho_c}^R \left[\ln\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right) \right]^{m+1} \cdot \rho \cdot d\rho \approx \frac{1}{m+1} \cdot \left(\frac{S}{2}\right)^{2+m}. \quad (2.57)$$

Принимая во внимание формулу (2.57), полная работа пластического деформирования угловой зоны обретает вид:

$$A_{yz}^{полн} = Y \cdot \int_0^L \theta(u) \cdot du, \quad (2.58)$$

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 (2.52) и допущения об аппроксимации границы пластической области принимает следующий вид:

$$A_o^{полн} = \int_0^L Z \cdot \theta(u) \cdot du, \quad (2.59)$$

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

Полная функция работ для правой половины профиля определяется на основе формул (2.53), (2.58) и (2.59):

$$A^{полн} = \int_0^L \left[W \cdot \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} + (Y + Z) \cdot \theta(u) \right] \cdot du . \quad (2.60)$$

Теперь надлежит решить вариационную задачу с подвижной границей:

$$\delta A^{полн} = \delta \int_0^L \xi(\dot{\theta}, \theta, u) \cdot du , \quad (2.61)$$

где ξ равно подынтегральной функции в формуле (2.60).

Решение задачи (2.61) сводится к интегрированию уравнения Эйлера [134]:

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

которое принимает следующий вид:

$$\frac{d(\dot{\theta})^{2m+1}}{du} = \zeta , \quad (2.62)$$

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

Решение дифференциального уравнения (2.62) в окончательном виде представляется функцией:

$$\theta(u) = D \cdot (\zeta \cdot u + C_1)^B + C_2 , \quad (2.63)$$

где C_1, C_2 – константы, подлежащие определению.

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

Граничные условия для определения констант в решении (2.63) формулируются таким образом:

$$\theta(u)|_{u=0} = 0; \quad \frac{d\theta}{du} \Big|_{u=0} = 0 .$$

После удовлетворения указанным граничным условиям решение (2.63) приобретает вид:

$$\theta(u) = D(\zeta \cdot u)^B . \quad (2.64)$$

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

$$L = \left(\frac{\theta_k}{D} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{\zeta} . \quad (2.65)$$

Рассмотрим предельные случаи для модели (2.65). Если положить $C = 0$ ($Z = 0$), то получаем модель Гунна-Полухина для формовки уголка из упрочняющейся полосы [107]. Полагая $m = 0$ (неупрочняющийся материал заготовки), легко показать, что предлагаемая модель в точности совпадает с моделью

Бхаттачария-Коллинза [4] и с моделью ЗПП при стесненном изгибе для случая формовки изотропной полосы с постоянным радиусомгиба и одинаковым средним диаметром формирующих роликов смежных переходов [5].

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

2.5. Определение предельных параметров формовки угловых зон при торцевом поджатии с помощью конечно-элементного анализа [135]

В пункте 2.3.2 рассмотрено влияние торцевого поджатия (подсадки полки) на параметры угловой зоны, связанное с утолщением угловой зоны. Кроме этого, торцевое поджатие позволяет уменьшить пружинение угловой зоны или даже сделать его отрицательным [87], получить радиус изгиба меньше допустимого для данной заготовки в случае гибки моментом. Однако в этом случае существуют ограничения на уровень напряжений или величину торцевого поджатия. С одной стороны, это сопряжено с потерей устойчивости поджимаемой полки (обычно при посадке наружного контура зоны изгиба на инструмент [127]), а с другой – с образованием микроскладок или нарушением покрытия по внутреннему контуру зоны изгиба [124].

Величина поджатия задается шириной заготовки и конструкцией формирующих роликов. Поэтому создание модели, позволяющей прогнозировать геометрию зоны изгиба и пружинение, является весьма важной задачей для технологии в части назначения параметров заготовки и роликового калибра.

Разработка аналитических моделей процесса подсадки осложняется тем, что необходимо решать задачу теории пластического течения с учетом перемещений материальных частиц при неопределенности задания условий на границе раздела прямолинейного и радиусного участков заготовки. Кроме того, при высвобождении угловых зон роликового калибра заранее невозможно прогнозировать кривизну свободных от нагрузки контуров зоны изгиба заготовки. Применение экспериментальных методов также мало пригодно для решения технологических вопросов: измерение напряжений и деформаций в угловой зоне, например, тензометрированием, затруднено из-за малости ее размеров.

Поэтому более целесообразно использование моделирования процесса подсадки заготовки с помощью метода конечных элементов. С этой целью 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 СтЗсп толщиной 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм. Тестовое решение задач для различных толщин заготовки при упрощающих условиях с целью уменьшения времени расчета показало схожесть

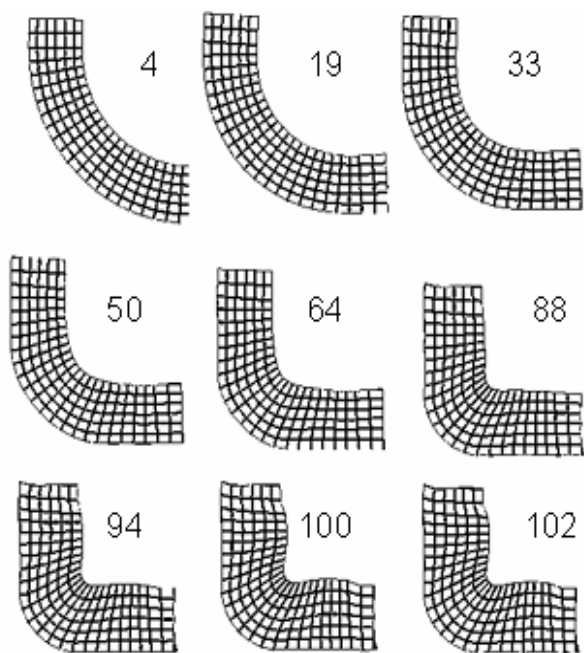


Рис. 2.10. Модели угловой зоны на различных этапах нагружения по шагам

процессов деформирования, поэтому моделирование проводили для заготовки условно-единичной толщины. Скорость нагружения соответствовала реальной скорости процесса формообразования, который разбивали на ряд последовательных шагов, наиболее характерные из которых приведены на рис. 2.10.

Для характерных шагов изучали напряженно-деформированное состояние в угловой зоне. Для иллюстрации представим результаты для промежуточного (43-го) шага нагружения, соответствующего границе технологически допустимой области по значению величины торцевого поджатия.

Анализ напряжений вдоль биссектрисы угла с точкой отсчета, лежащей на внутреннем контуре, показывает, что напряжения в окружном направлении на внутреннем и наружном контурах существенно отличаются по абсолютной величине (рис. 2.11). В классическом решении задачи чистого изгиба они должны были бы совпадать. Нейтральный слой напряжений мигрирует в сторону наружного контура (см. точку схождения графиков на рис. 2.11) в отличие от чистого изгиба, где нейтральный слой напряжений (НСН) смещается к внутреннему контуру на величину:

$$\Delta S = \frac{r + R}{2} - \sqrt{r \cdot R},$$

где r , R – радиусы кривизны внутреннего и наружного контуров зоны изгиба соответственно.

Величина смещения НСН составляет $0,1S_0$ (S_0 – толщина исходной заготовки). Значения напряжений в окружном направлении и положение НСН свидетельствуют о разгрузке наружного контура зоны изгиба, что позволяет производить гибку заготовки на меньшие радиусы, чем те, что традиционно приводятся в многочисленных справочниках по холодной штамповке. По рис. 2.11 можно также уста-

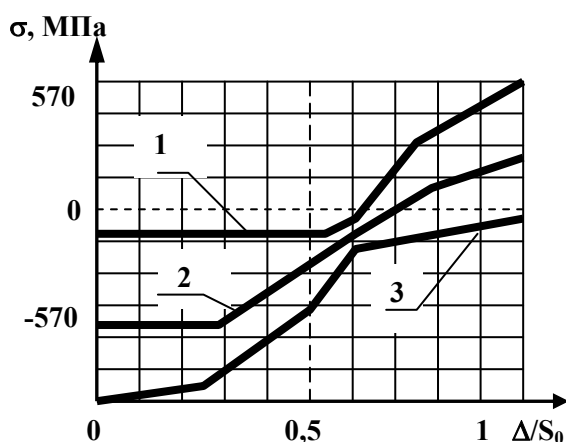


Рис. 2.11. Распределение главных напряжений по биссектрисе угла: 1 – радиальное; 2 – продольное; 3 – окружное

новить вид напряженного состояния по значению фактора Лоде [129]:

$$v_{\sigma} = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Подставляя соответствующие значения напряжений, взятые с рис. 2.11, в последнюю формулу, получаем, что практически во всех точках биссектрисы угла выполняется условие $v_{\sigma} \approx 0$, то есть имеет место случай плоской деформации, что вполне закономерно для данной модели.

Деформационные характеристики угловой зоны также соответствуют реальному процессу деформирования [136]. Уровень окружных деформаций (без учета их знака) на наружном контуре не превышает 10%, а на внутреннем контуре составляет 25% (рис. 2.12). Следовательно, наружный контур разгружается за счет действия торцевых сил, внутренний нагружается дополнительно (при чистом изгибе окружная деформация наружного контура составляет около 20% при той же геометрии угловой зоны). Анализ двух остальных деформаций (радиальной и продольной) показывает, что условие плоской деформации выполняется (продольная деформация в любой точке заготовки на биссектрисе угла не превышает 0,4%). Условие несжимаемости также выполняется:

$$\sum_{i=1}^3 \varepsilon_i = 0,$$

где ε_i – i -я главная деформация.

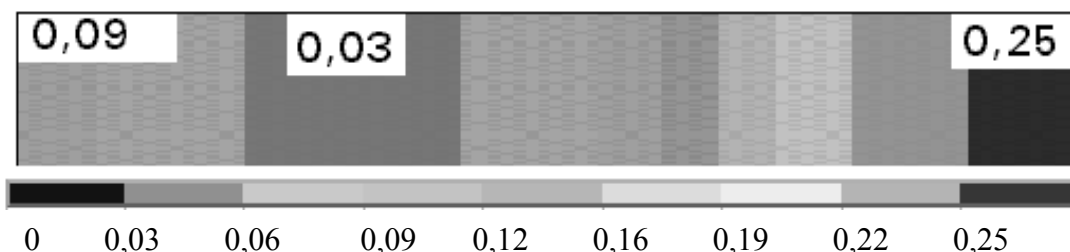


Рис. 2.12. Распределение окружных деформаций без учета знака вдоль биссектрисы угла (вверху) от внутреннего контура к наружному (справа налево) и калибрующая шкала (внизу)

Аналогичные закономерности деформирования наблюдаются и на других этапах нагружения. При последующем нагружении после посадки наружного контура его окружные деформации находятся в стадии стагнации. Дальнейшее деформирование сопровождается набором толщины в зоне, примыкающей к биссектрисе угла, и на свободных полках. В реальном процессе деформирования набора толщины на полках не наблюдается по двум причинам: 1) в большинстве случаев внутренний радиус зоны изгиба задается инструментом по его номинальному значению с чертежа, так что зоны высвобождения отсутствуют, и движение материала при существенном избытке ширины заготовки происходит в осевом направлении (условие плоской деформации не выполняется); 2) при наличии зон высвобождения ширину заготовки выбирают такой, чтобы

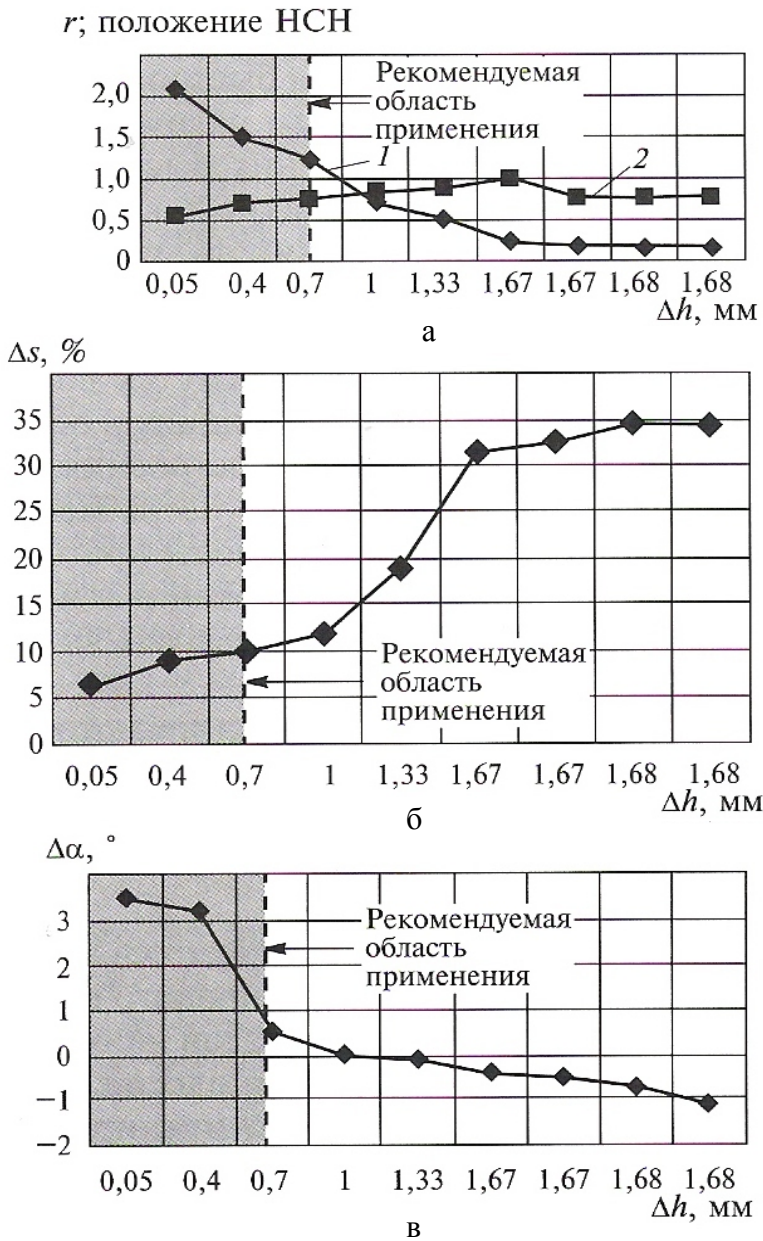


Рис. 2.13. Зависимости параметров зоны изгиба от величины поджатия полки: а – внутреннего радиуса (кривая 1), положения НСН (кривая 2); б – величины утолщения угловой зоны; в – угла пружинения

ны подсадки по оси абсцисс соответствуют моделям (рис. 2.10) в порядке их следования.

Рис. 2.13, схема (а) показывает монотонное изменение радиуса кривизны внутреннего контура зоны изгиба и почти линейную зависимость смещения НСН от величины поджатия. При этом выход НСН на наружный контур зоны изгиба наблюдается примерно на 88 шаге нагружения (см. рис. 2.10). Это означает, что вся зона изгиба находится в пластическом состоянии, радиус кривиз-

утолщения полки или потери устойчивости не происходило. Правда, уменьшение продольной деформации возможно за счет переднего поджатия [137], что существенно усложняет технологию и на практике применяется редко, хотя и позволяет получить существенное утолщение в угловой зоне (до 20 – 30%). Обычно заказчик заявляет желаемое утолщение в зоне изгиба до 5 – 10%, что достижимо выбором ширины заготовки.

При высвобождении угловой зоны калибра весьма трудно предсказать теоретически величину радиуса, утолщения и пружинения заготовки, в то время как МКЭ является достаточно эффективным инструментом для такого рода исследований. Рассмотрим полученные в результате расчета наиболее важные для технологии характеристики радиуса кривизны, утолщения и пружинения при подсадке полки, приведенные на рис. 2.13 с обозначением рекомендуемой области применения подсадки. Значения вели-

ны внутреннего контура стабилизируется и фактически исчерпывается ресурс пластичности материала.

Дальнейшая подсадка приводит к потере устойчивости полки в форме изгиба с последующим утолщением (см. шаги 94 – 102 на рис. 2.10). Изменение утолщения показывает, что оно может превышать 30% (см. рис. 2.13, б), 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 [5]. Исследование МКЭ напряжений подсадки в полке показывает, что при величине подсадки 0,7 мм среднее напряжение торцевого поджатия составляет не более $0,5\sigma_s$. На рис. 2.10 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 [129] вследствие касательных напряжений, распределение которых имеет вид двугорбой кривой.

На рис. 2.13, схема (в) видно, 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 радиусгиба – $r(\Delta h) = 2,978 \cdot \exp(-0,356 \cdot \Delta h)$,
- утолщение (в процентах) – $\Delta S(\Delta h) = 5,38 \cdot \exp(0,236 \cdot \Delta h)$,
- пружинение (в градусах) – $\Delta \alpha(\Delta h) = 0,1012 \cdot (\Delta h)^2 - 1,5536 \cdot \Delta h + 5,0524$,

где Δh – величина подсадки в мм.

Таким образом, поджатие полки при высвобождении угловых зон за счет конструкции формирующего инструмента позволяет расширить возможности технологии в части изменения конфигураций угловых зон изготавливаемого профиля, а возникающее при этом торцевое сжатие дает возможность разгрузить наружный контур зоны изгиба 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 людских, материальных и энергетических ресурсов и обеспечением достаточной точности и надежности расчетов.

2.6. Выводы

Представленный классификатор, сформированный по конструктивно-технологическим признакам, позволяет выявить особенности формообразова-

ния профилей с отбортовками и может быть использован при разработке технологии их изготовления.

Построенная модель определения НДС в угловых зонах и изменения толщины заготовки, учитывающая различие схем нагружения на предварительных и окончательных переходах, позволяет производить уточненный расчет ширины заготовки.

Полученное инженерным методом решение задачи о формообразовании профилей из упрочняемой полосы позволяет определить протяженность ЗПП, а также предельные углы подгибки по критерию отсутствия переформовки заготовки, сравнивая модельное значение ЗПП с межклетьевым расстоянием профилировочного станка.

Конечно-элементное моделирование формообразования зон изгиба при торцевом сжатии позволило выявить предельные значения радиуса изгиба, утолщения и пружинения, которые могут использоваться при разработке технологии производства профилей с отбортовками.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Организационные аспекты экспериментальных исследований

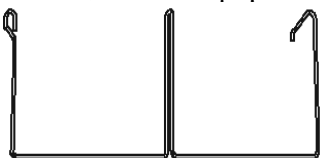
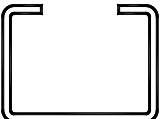

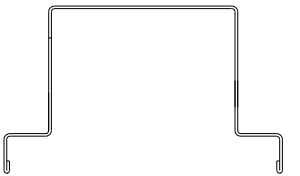
Основные задачи экспериментальных исследований заключались в выявлении взаимозависимостей между факторами процесса профилирования и выходными параметрами профилей с отбортовками, получение которых аналитическими методами или конечно-элементным моделированием затруднительно или нецелесообразно. В других случаях экспериментальные исследования проводились для верификации теоретических моделей.





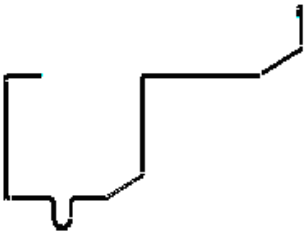

3.1.1. Предмет экспериментальных исследований и основные факторы процесса

Объектом экспериментальных исследований являются технологии производства МИД гнутых профилей с отбортовками. Предметом экспериментальных исследований является выявление взаимосвязи факторов процесса и параметров получаемых профилей с отбортовками. Номенклатура профилей, подвергнутых исследованию, приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры исследуемых профилей

№	Сечение типового представителя	Размеры сечения, мм
1	Специальной формы 	30×77,5×0,7
2	С-образный 	57×34×(4-13)×(0,7-1,5)
3	Специальной формы 	89×45×0,6
4	Специальной формы 	85×55×0,85

№	Сечение типового представителя	Размеры сечения, мм
5	Специальной формы 	40,5×27,5×1,5
6	Специальной формы 	42×28,5×1,0
7	Специальной формы 	35×27×1,5
8	Z-образный 	38×35×0,7
9	Специальной формы 	77×30×0,7
10	C-образный 	200×80×2

Материалы для экспериментальных исследований были predeterminedены номенклатурой профилей с отбортовками, пользующихся спросом на отечественном рынке. Применялись заготовки преимущественно из низкоуглеродистых сталей толщиной от 0,5 до 1,5 мм. Свойства заготовок удовлетворяли заявленным характеристикам по сертификатам, что также подтверждалось выборочными испытаниями образцов в ОАО «Ульяновский НИАТ».

На основе изучения библиографических источников (см. раздел 1 работы) было установлено, что основными факторами, влияющими на процесс пластического формоизменения заготовки при использовании МИД, являются:

- **характеристики станка** (число переходов и межклетьеовое расстояние);
- **геометрия сечения профиля** (форма и размеры);

– **технологические факторы** (параметры заготовки; схемы и режимы формообразования, включающие углы подгибки по переходам).

Изучение влияния прочностных характеристик на процесс формообразования профилей с отбортовками в работе не предусматривалось.

3.1.2. Оснащение и методы экспериментальных исследований

При реализации экспериментальных исследований применяли оборудование, инструменты и приборы, указанные в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Оборудование, инструменты и приборы для экспериментальных исследований

№	Наименование	Назначение	Прим.
1.	Ножницы дисковые ДИН-600	Подготовка заготовок	
2.	Гибочно-прокатный станок ГПС-300	Профилирование заготовок	
3.	Экспериментальная оснастка	Исследование схем формообразования	
4.	Прибор МПБ-2	Измерение расстояний на элементах профиля	
5.	Прибор ПМТ-3	Измерение толщины	
6.	Цифровой фотоаппарат QV-R4 фирмы CASIO, сканер «MUSTEK- 4800»	Фотографии и изображения образцов	
7.	Компьютер Pentium (I – III)	Ведение базы данных изготавливаемых профилей, технологических особенностей изготовления, статистическая обработка результатов, выполнение расчетов	
8.	Штангенциркули ШЦ-I, ШЦ-III	Измерение линейных параметров заготовок, оснастки	

Другие средства измерений и вспомогательные средства указаны в соответствующих подразделах работы.

В качестве основных методов исследований применялись:

- геометрические методы измерения линейных и угловых величин;
- метод измерения толщины;
- методы статистического анализа.




Содержание экспериментальных исследований определяется наименованием нижеследующих подразделов данного раздела работы.

3.2. Исследование влияния вида нагружения на параметры угловых зон [130]

Для проверки зависимостей, полученных в разделе 2.3, и с целью иллюстрации применения данной модели проведено исследование несимметричных профилей (табл. 3.3), формируемых по различным схемам (рис. 3.1).

Таблица 3.3

Профили, используемые при исследовании

№	Сечение профиля	Размеры, мм	Материал	Применение
1.		42×28,5×1,0	08пс	Мебельный профиль
2.		35×27×1,5	08пс	Мебельный профиль
3.		38×35×0,7	Д16	Стрингер

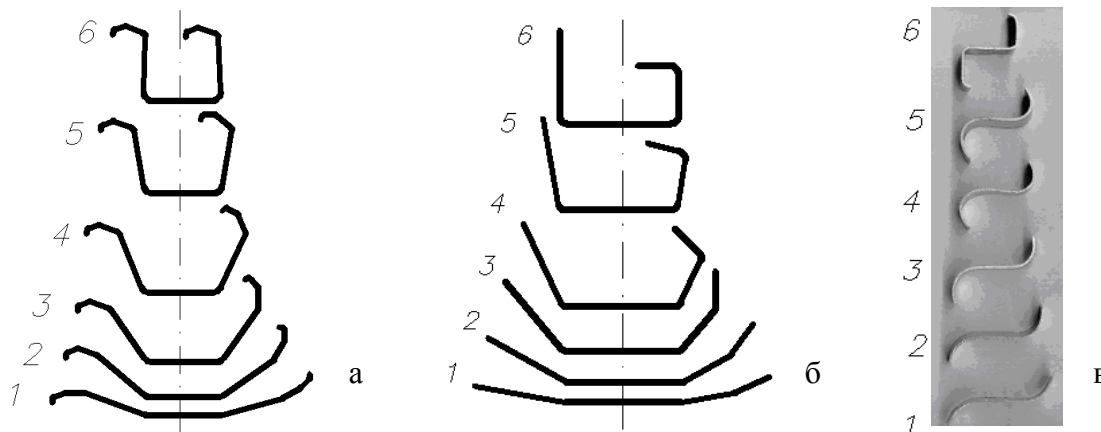


Рис. 3.1. Схемы формообразования профилей: а, б, в соответствуют профилям № 1, № 2, № 3

Из образцов готовых профилей с целью повышения точности измерений изготавливали шлифы. Для удобства работы со шлифами образцы профилей были разделены на зоны, залиты в обоймы быстротвердеющим сплавом протокриловой группы, отшлифованы в три прохода с последующей полировкой. На рис. 3.2 показано разделение образцов на элементы, здесь же показаны шлифы, на которых проводились измерения. Наибольший интерес для изучения представляют точки 8 и 9 профиля № 1 и точки 2 и 3 профиля №2, для которых возможно как утолщение, так и утонение в процессе формообразования ввиду особенностей их схем формообразования.

Замеры толщины элементов профиля производили на приборе ПМТ-3М. Результаты измерений с точностью до 0,01 мм сведены в табл. 3.4.

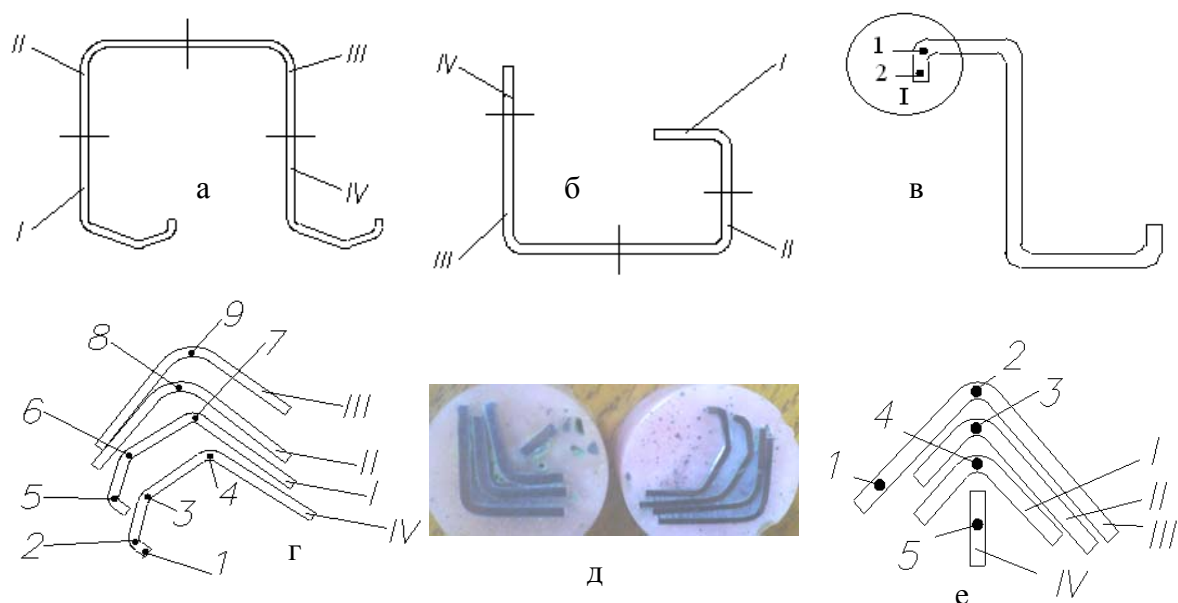


Рис. 3.2. Зоны и точки замеров толщины: а, б, в – расположение зон на профилях № 1, № 2, № 3 соответственно; г – разделение профиля № 1 на зоны; д – шлифы элементов профиля № 1 и № 2; е – разделение профиля № 2 на зоны

Таблица 3.4

Результаты измерения толщины элементов готовых профилей

Профиль № 1			Профиль № 2			Профиль № 3		
Зона	Точка	Толщина, мм	Зона	Точка	Толщина, мм	Зона	Точка	Толщина, мм
I	5	1,04	I	4	1,52	I	1	0,88
	6	1,03	II	3	1,53		2	0,93
	7	1,02	III	1	1,49	–	–	–
8	1,05	2		1,44	–	–	–	
III	9	0,97	IV	5	1,49	–	–	–
IV	1	1,00	–	–	–	–	–	–
	2	1,08	–	–	–	–	–	–
	3	0,98	–	–	–	–	–	–
	4	0,95	–	–	–	–	–	–

Результаты расчета по зависимостям (2.35) и (2.36) для указанных характерных точек, прилегающих к базовому элементу, профилей №1 и №2 представлены на рис. 3.3 и 3.4. На рис. 3.3 представлено изменение толщины заготовки в процентном отношении в каждом из переходов, а на рис. 3.4 показано суммарное значение изменения толщины заготовки с указанием влияния каждого перехода на формирование данной величины. Верх черного участка столбчатой диаграммы (рис. 3.4) показывает суммарную величину изменения толщины. Из этого же рисунка можно понять, на каких переходах происходит утяжка (утонение), а на каких – подсадка заготовки (утолщение).

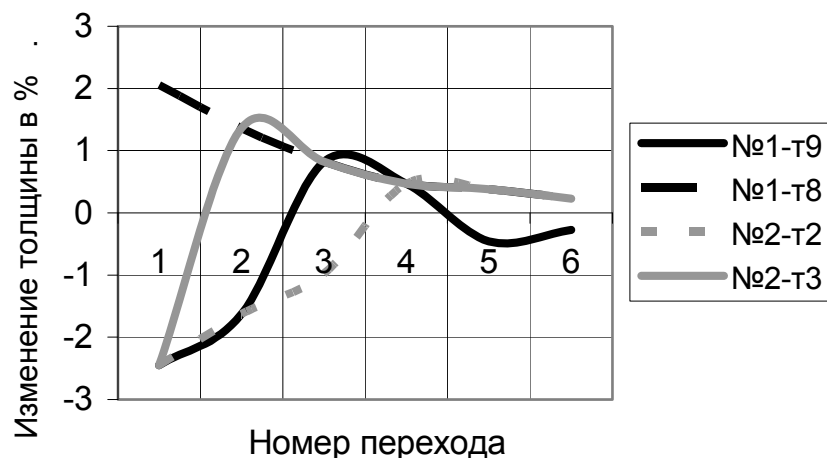


Рис. 3.3. Расчетные значения изменения толщины зон изгиба по переходам

Эти результаты хорошо коррелируют со схемами формообразования (рис. 3.1а,б), откуда хорошо видно, что левая часть профиля формируется по открытой схеме (вид нагружения – растяжение), а правая – по закрытой (вид нагружения – поджатие). Полученные значения изменения толщины на рис. 3.4 хорошо согласуются с опытными данными: для точек 8 и 9 (профиль №1) экспериментальные значения составляют +5 % и –3% (см. табл. 3.4), а расчетные – +5,31% и –5,52% соответственно; для точек 2 и 3 (профиль №2) экспериментальные значения составляют –4% и +2% (см. табл. 3.4), а расчетные – –3,98% и +0,81% соответственно. Отсюда видно, что теоретические модели достаточно точно описывают изменение толщины заготовки в зонах изгиба в зависимости от вида нагружения.

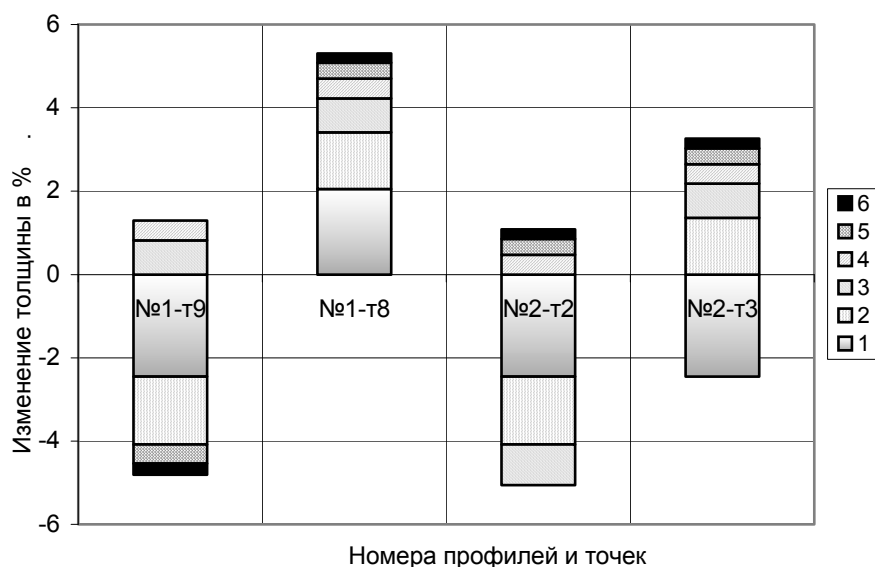


Рис. 3.4. Столбчатая диаграмма суммарного изменения толщины зон изгиба: номера в условном обозначении соответствуют номерам переходов

Формообразование отбортовок, как видно из рис. 3.1, осуществляется в основном монотонно на первых переходах. Особо следует отметить схему формообразования профиля №3 (рис. 3.1,в), которая приведена ради иллюстрации

отличия между интенсивным деформированием и стесненным изгибом. В последнем методе волнообразную заготовку осаживают в окончательном переходе, в результате чего зоны изгиба приобретают утолщение. Следует отметить, что при стесненном изгибе заготовка имеет существенно большее значение припуска по ширине (избыток ширины), чем при МИД.

3.3. Исследования влияния ширины отбортовки на изменение толщины зон изгиба на основе полного факторного эксперимента [131]

Заказы на технологии производства профили С-образного типа составляют до 15–20% от годового портфеля заказов предприятий-разработчиков технологий МИД г. Ульяновска, поэтому исследование влияния ширины отбортовок, обращенных во внутрь, на параметры процесса формообразования представляет собой важную в практическом отношении задачу. В качестве объекта исследования был взят С-образный профиль (рис. 3.5), величина отбортовки и толщина материала которого варьировались согласно табл. 3.5 [131]. Экспериментальные исследования проводили на станке ГПС-300. Заготовки (по три образца на каждый опыт) подвергали профилированию за 4 – 6 переходов (в зависимости от условий эксперимента).

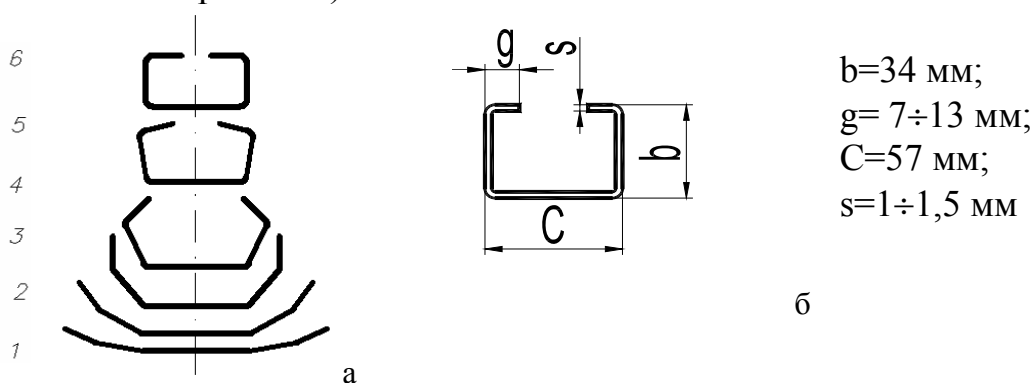
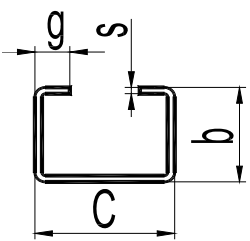


Рис. 3.5. Исследуемый профиль: а – схема формообразования; б – параметры

Таблица 3.5

Параметры профиля и варьируемые величины

Эскиз сечения профиля	Варьируемые величины и их значения		
	Угол подгибки $\Delta\alpha$, град.	Толщина s , мм	Величина отбортовки g , мм
	8; 14; 20	1,0; 1,2; 1,4	7; 10; 13

Исследования проводили на основе полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^3 , при этом модель процесса представляли функцией отклика (изменение толщины заготовки в угловой зоне):

$$y = f(g, s, \Delta\alpha).$$

Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам постановочных экспериментов (здесь не даются) и приведены в табл. 3.6. Изменение толщины определялось на каждом переходе (табл. 3.7), а далее производилась обработка массивов данных методами статистического анализа приложения Excel (Microsoft Office).

Результаты расчетов и измерений приведены в табл. 3.7.

Для удобства визуального анализа результаты измерений были представлены в виде столбчатых диаграмм, иллюстрирующих изменение толщины материала в зоне изгиба, примыкающей к отбортовке, по переходам в процессе формообразования профиля (рис. 3.6). Цифрами на столбчатых диаграммах указаны значения ширины отборонок. В сопоставлении со схемой формообразования можно выявить и причины, приводящие к изменению толщины.

Таблица 3.6

Уровни и интервалы варьирования факторов

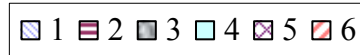
Значения факторов	X ₁	X ₂	X ₃
	g, мм	S, мм	$\Delta\alpha$, °
Верхний уровень (+1)	13	1,4	20
Нижний уровень (-1)	7	1	8
Основной уровень (0)	10	1,2	14
Интервал варьирования	3	0,2	6

Таблица 3.7

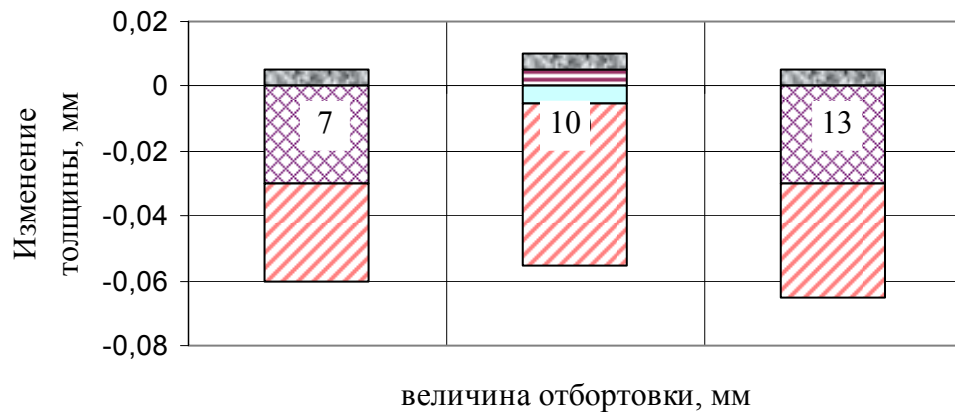
План и результаты ПФЭ 2³

№	Основные столбцы			Вспомогательные столбцы				Выход процесса (изменение толщины в процентах)				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 ₁	y ₂	y ₃	y _{ср}	s ²
	g	s	α									
1	-	-	-	+	+	+	-	6,4	6,4	6,5	6,433	0,0033
2	+	-	-	-	+	-	+	7,1	7,0	7,1	7,067	0,0033
3	-	+	-	-	-	+	+	10,6	10,5	10,6	10,567	0,0033
4	+	+	-	+	-	-	-	13,8	13,9	13,9	13,867	0,0033
5	-	-	+	+	-	-	+	5,20	5,1	5,2	5,167	0,0033
6	+	-	+	-	-	+	-	5,8	5,8	5,90	5,833	0,0033
7	-	+	+	-	+	-	-	8,0	8,10	7,95	8,017	0,0058
8	+	+	+	+	+	+	+	11,3	11,2	11,2	11,233	0,0033

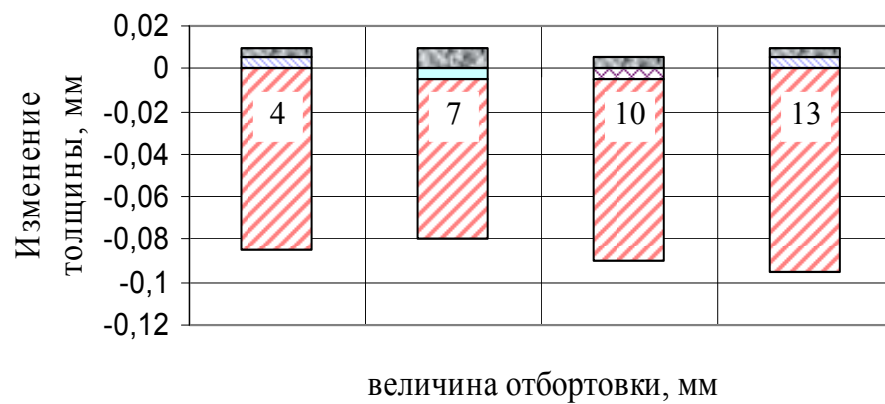
Условные обозначения переходов:



а



б



в

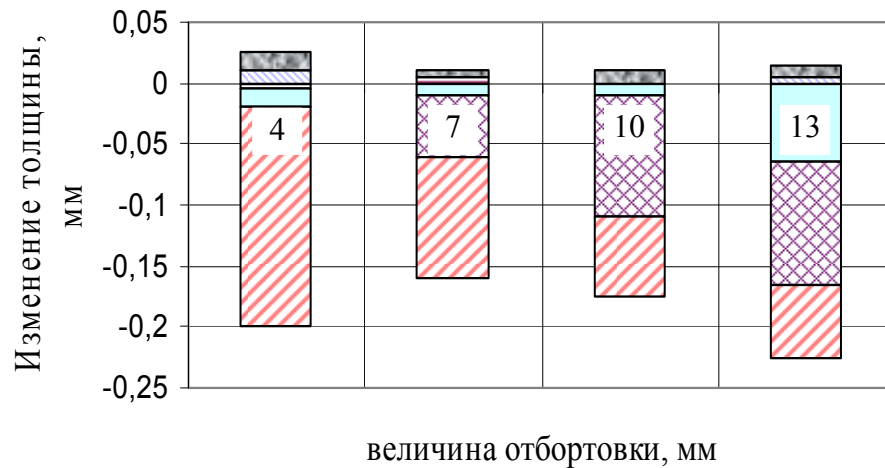


Рис. 3.6. Столбчатая диаграмма суммарного изменения толщины материала в зоне изгиба отбортовки в процессе формирования профиля: 1 – 6 – технологические переходы; а – s=1,0 мм; б – s=1,2 мм; в – s=1,5 мм

В результате обработки массива данных с помощью пакета «Регрессия» получаем следующую регрессионную модель:

$$y=8,52292+0,97708x_1+2,39792x_2-0,96042x_3+0,65208x_1x_2-0,33542x_2x_3. \quad (3.1)$$

Данное уравнение представляет собой модель зависимости изменения толщины материала в зоне изгиба, примыкающей к отбортовке, в процентах к толщине исходной заготовки в зависимости от факторов процесса: x_1, x_2, x_3 . Отклонения экспериментальных значений по регрессионной зависимости $y = f(g, s, \Delta\alpha)$ отличаются от теоретических данных разд. 1 не более чем на 14%.

На рис. 3.7 представлены образцы профиля после каждого из технологических переходов.

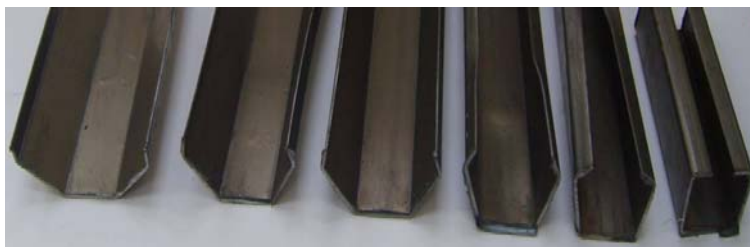


Рис. 3.7. Образцы заготовки С-образного профиля

В целом полученная регрессионная модель показывает, что на изменение толщины заготовки решающее влияние оказывает толщина заготовки.

3.4. Исследование влияния промежуточных радиусов изгиба заготовки на геометрические параметры сечения профиля

К применяемым в производстве летательных аппаратов профилям из алюминиевых сплавов с плакирующим слоем предъявляются повышенные требования в отношении сохранности плакирующего слоя и утонения основного материала. Однако производство профилей с толщиной стенок более 2 мм вызывает нарушение плакирующего слоя из-за больших контактных давлений при осадке заготовки, что характерно для стесненного изгиба. При данных обстоятельствах целесообразным является применение метода интенсивного деформирования (МИД) [87], в котором формообразование профиля осуществляется с постоянными радиусами изгиба на всех технологических переходах. Схема формообразования профиля при использовании МИД является также достаточно «жесткой» из-за больших углов подгибки на первых переходах и также приводит к утонению заготовки и сравнительно большим контактным напряжениям. Гипотетически уменьшение углов подгибки в первых клетях станка и переход к плавно изменяющемуся радиусу изгиба угловых зон при формообразовании могли бы уменьшить уровень контактных напряжений и деформационных характеристик заготовки.

Для данного случая предлагается техническое решение по полезной модели [138], где углы подгибки по переходам определяются формулой:

$$\alpha_k = \arcsin \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\sin \left(\frac{k \cdot \alpha}{N} \right) + \frac{k}{N} \cdot \sin \alpha \right] \right\}, \quad (3.2)$$

где k – номер текущего перехода; α – суммарный угол подгибки (угол на готовом профиле); N – число переходов, а высота вертикального бурта замкнутого калибра составляет величину $3S$, причем скругление бурта задается формулой:

$$\Delta_k = 2 \cdot b \cdot \sin\left(\alpha_k - \frac{\Delta\alpha_k}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\alpha_k}{2}\right), \quad (3.3)$$

где b – высота подгибаемой полки; α_k – суммарный угол подгибки на k -м переходе ($k = 2, 3 \dots N$); $\Delta\alpha_k$ – угол подгибки полки в k -м переходе.

Модель утонения угловых зон (см. разд. 2 работы) пригодна и для данного процесса формообразования. Для сопоставления аналитической модели с результатами конечно - элементного моделирования и экспериментальных работ, проведено проектирование и отработка технологии производства корытного профиля $30,5 \times 8,5 \times 2$ мм (рис. 3.8). Ожидаемый результат при варьировании промежуточных радиусов заготовки (радиусов на предварительных переходах) состоит в возможном уменьшении утонения и снижении уровня контактных напряжений в угловых зонах.

В связи с этим изучали влияние на указанные выше параметры профиля схемы формообразования, типичной для МИД (схема №1), и более мягкой схемы (схема №2). Характеристики указанных схем формообразования приведены в табл. 3.8.

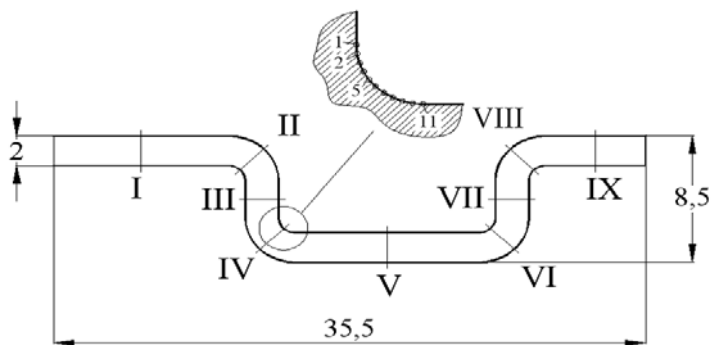


Рис. 3.8. Чертеж профиля корытного типа $35,5 \times 8,5 \times 2$ мм: I, IX – горизонтальные участки, II, IV, VI, VIII – угловые зоны, III, VII – вертикальные участки, V – горизонтальный донный участок

Таблица 3.8

Параметры схем формообразования для исследования

Параметр и его размерность	Изменение радиусов изгиба и углов подгибки по переходам						Примечание
	1	2	3	4	5	6	
R_i , мм	1	1	1	1	1	1	Схема №1 ($r = \text{const}$)
α_i , град.	15	30	45	60	75	90	
R_i , мм	7,1	3	1,8	1,3	1	1	Схема №2 ($r = \text{var}$)
α_i , град.	22	45	65	80	90	90*	

Для конечно-элементного моделирования использовали модуль LS-DYNA интегрированного пакета ANSYS¹, с помощью которого моделировали

¹ Моделирование процесса проведено инженером Барановым А.С. и канд. техн. наук Илюшкиным М.В.

обе схемы формообразования для выявления утонения в зонах изгиба профиля и величин контактных напряжений. Результаты моделирования, отражающие утонение заготовки в угловых зонах, представлены на рис. 3.9, откуда видно, что в зоне 4 отличие утонений профилей, выполненных по схеме № 1 и схеме № 2, составляет около 20%, в то время как в зоне 4 такое отличие лежит в пределах 35%.

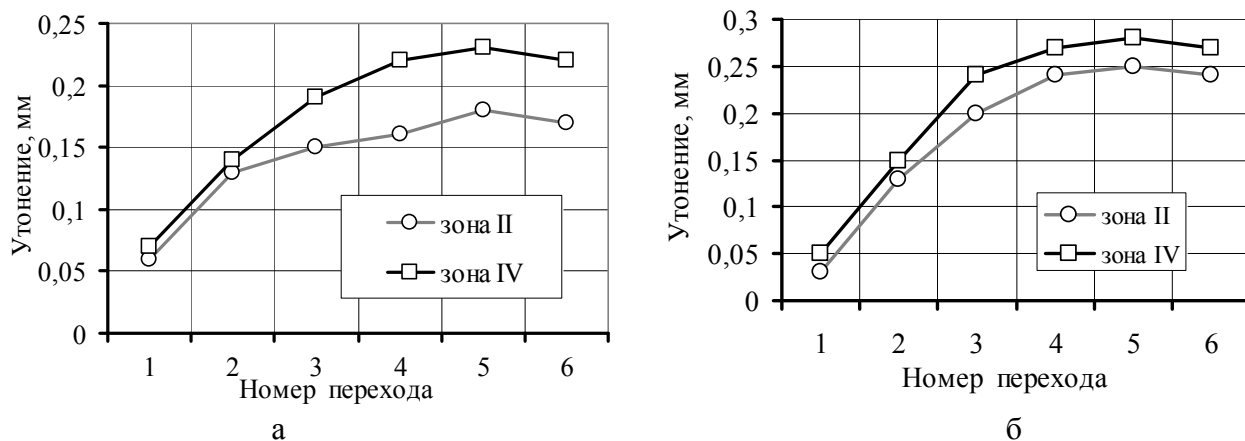


Рис. 3.9. Величина утонения по угловым зонам профиля при моделировании: а – в схеме с переменными радиусами; б – в схеме с постоянным радиусом

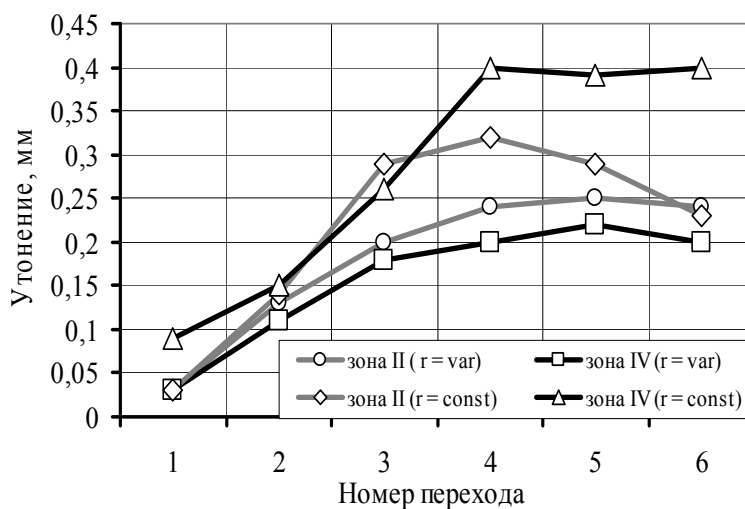


Рис. 3.10. Экспериментальные значения утонений в угловых зонах II и IV

Результаты экспериментального исследования утонений в угловых зонах приведены на рис. 3.10, где даны величины утонений для схемы №1 ($r = \text{const}$) и для схемы №2 с переменными радиусами ($r = \text{var}$).

С использованием конечно-элементного моделирования исследовали также распределение контактных напряжений по внутреннему контуру угловой зоны IV (см. рис. 3.8), наименее подверженной действию торцевого поджатия. Дело в том, что при высвобождении угловой зоны со стороны наружного контура заготовки действие торцевого поджатия может приводить к «посадке» заготовки по наружному контуру на инструмент, а контактные напряжения на внутреннем

контуре зоны изгиба становятся нулевыми. На рис. 3.8 показаны метками точки внутреннего контура зоны изгиба, в которых регистрировались контактные напряжения.

При сравнении графиков распределения давления по внутренней уголко- вой зоне профиля для схем с переменными и постоянными радиусами (рис. 3.11 и 3.12) можно сказать, что для схемы с постоянными радиусами характерно пиковое распределение контактных давлений со значениями давлений, достигающими до 1500 МПа, для схем с переменными радиусами характерно куполообразное распределение давлений со значениями до 800 МПа, снижение максимального давления удается получить за счет более равномерного распределения давления по поверхности контакта. Характерно отсутствие давления по уголко- вой зоне на шестом переходе, что связано с наличием подсадки профиля, в результате чего уголковая зона стремится к калибровке по нижнему ролику.

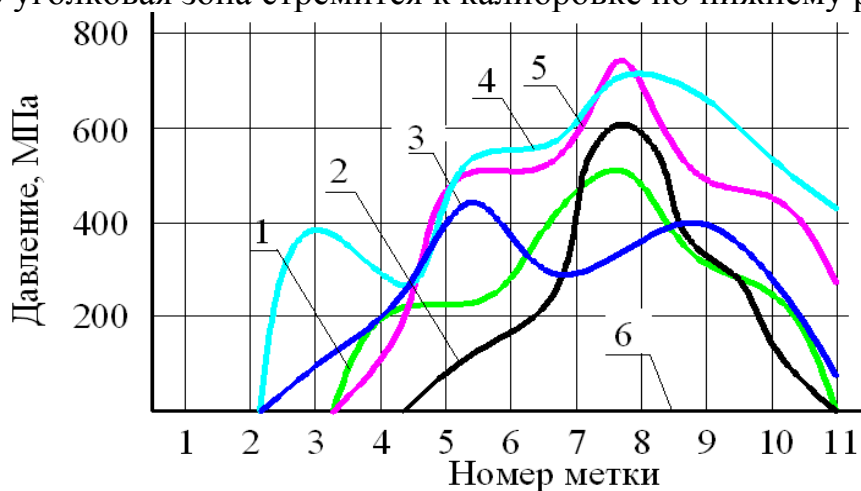


Рис. 3.11. Распределение контактных давлений по внутреннему контуру зоны изгиба IV в схеме формообразования с переменными радиусами: 1 – 6 – номера технологических переходов

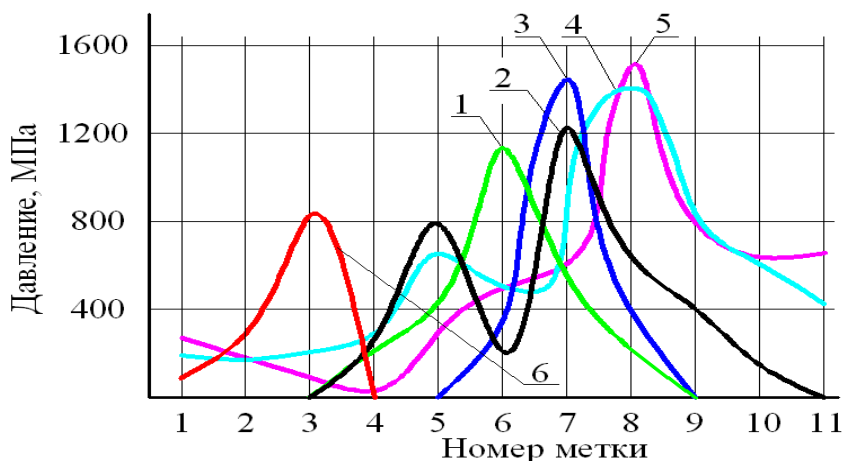


Рис. 3.12. Распределение контактных давлений по внутреннему контуру зоны изгиба IV в схеме формообразования с постоянным радиусом: 1 – 6 – номера технологических переходов

Таким образом, схема с переменными радиусами должна обеспечить лучшую сохранность покрытия за счет уменьшения максимальных давлений по

поверхности зоны изгиба. На рис. 3.10 также видно, что применение переменных промежуточных радиусов уменьшает величину утонения в 1,5 – 2 раза. Отметим особенность, связанную с уменьшением утонения в зоне 2 к последнему переходу при постоянном радиусе формовки. Дело в том, что в этом случае применялось торцевое поджатие на последнем переходе. При моделировании контактных напряжений в схеме с переменными радиусами формовки на последнем переходе также применяли торцевое поджатие, которое фактически полностью разгружает внутренний контур от контактных напряжений (см. рис. 3.11, линия контактных напряжений на шестом переходе).

Распределение контактных напряжений на первом переходе также хорошо видно и на рис. 3.13.

Проведенное моделирование позволило установить, что формовка по схеме с переменными радиусами лучше подходит по величине утонения материала и значению контактных напряжений.

На рис. 3.14 представлены образцы профилей, изготовленных по различным схемам.

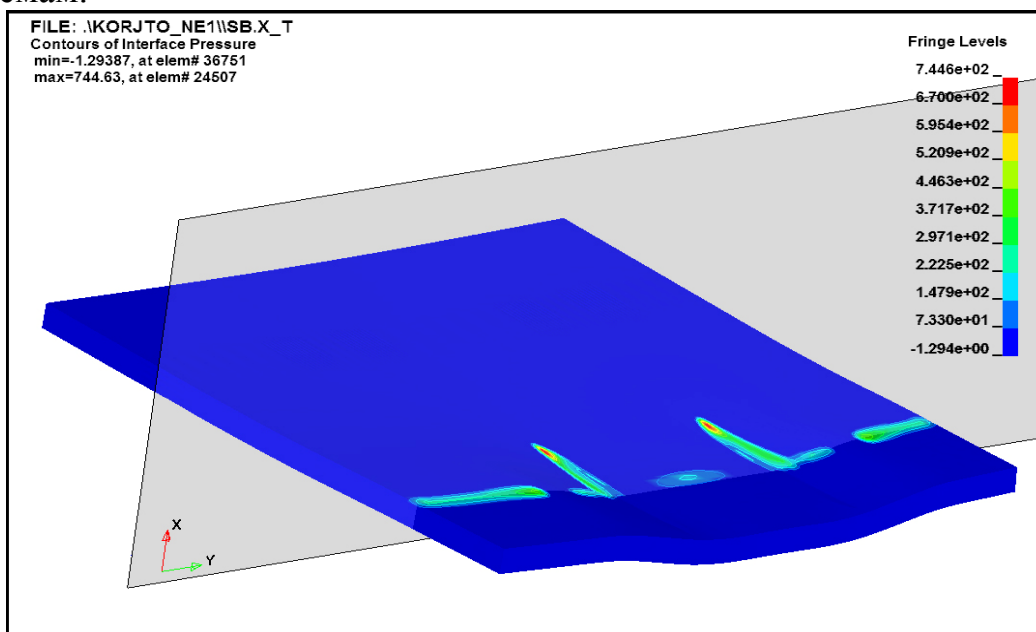


Рис. 3.13. Зоны контакта ролика и заготовки

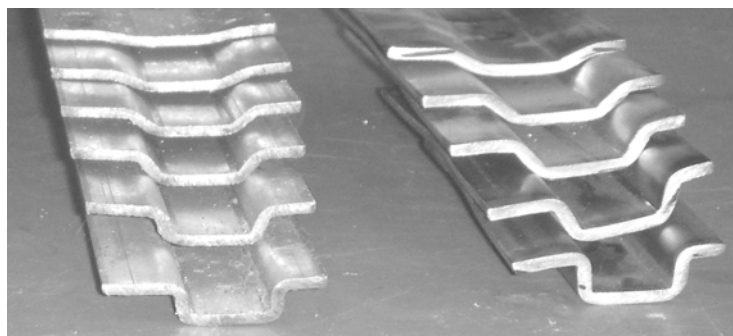


Рис. 3.14. Образцы профилей по переходам (слева направо) с постоянными радиусами формовки и с переменными промежуточными радиусами формовки

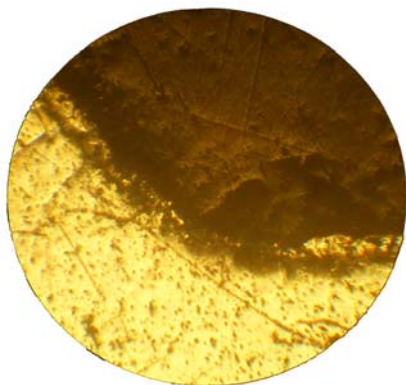


Рис. 3.15. Микрошлиф внутренней зоны профиля с дефектом нарушения покрытия



Рис. 3.16. Станок ГПС-350 М6 с технологической оснасткой для изготовления профиля 30,5×12,8×2 мм

Нарушение покрытия по внутреннему контуру зоны изгиба при использовании формовки с постоянным промежуточным радиусом изгиба приведено на рис. 3.15. Исследования микрошлифов угловых зон позволили установить, что уменьшение толщины покрытия в некоторых случаях составляло 40%.

На рис. 3.16 показана реализация процесса на одном из станков семейства ГПС разработки ОАО «Ульяновский НИАТ».

Предотвратить значительное растяжение металла при формовке профилей в рамках рассмотренных схем формообразования позволяет применение дополнительного торцевого сжатия, характерного для метода интенсивного деформирования. В работе [139] приведена процедура расчета изменения толщины заготовки в угловой зоне при торцевом поджатии. Для комбинированных схем формообразования, сочетающих боковую утяжку заготовки и подсадку полок в закрытом калибре, пригодна зависимость расчета относительного приращения ширины заготовки:

$$\Delta B = - \left[\sum_{k=1}^m \Delta s_k^p + \sum_{k=m+1}^n \Delta s_k^c \right] \frac{N(r + s_0 / 2)}{s_0}, \quad (3.4)$$

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

Как показывает зависимость (3.4), изменение толщины заготовки зависит от конечной величины радиуса изгиба. Величины утонений в формуле (3.4) определяются из соотношений (2.35) и (2.35) предыдущего раздела работы. Промежуточные радиусы изгиба входят в определение частных приращений для каждого из технологических переходов.

Следовательно, переход от фиксированных конечных радиусов изгиба на всех технологических переходах к более мягкому режиму с плавно изменяющимися по переходам радиусами изгиба в комбинации с торцевым поджатием позволяет уменьшить утонение заготовки и снизить уровень контактных напряжений, влияющих на параметры плакирующего покрытия.

3.5. Экспериментальное исследование возможности использования теоретической модели зоны плавного перехода в приложении к формовке сложных профилей с отбортовками [132, 133]

Разработанную модель протяженности зоны плавного перехода для профилей с гладкими полками следует проверить на предмет использования при расчетах формообразования профилей с отбортовками. В этом случае необходимо прибегнуть к так называемому методу локальной жесткости [4] и приводить полку, несущую элементы жесткости, к эквивалентной гладкой полке. Предлагается следующая процедура для каждого из переходов: а) выделяется каждая полка с элементом жесткости; б) рассчитывается полярный момент инерции относительно базовой (корневой) точки J_p и приравнивается к полярному моменту гладкой эквивалентной полки, откуда получаем эквивалентную толщину полки:

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

где b – ширина несущей полки.

Исследования проводили при формообразовании профилей с отбортовкой согласно табл. 3.1 и рис. 3.17, на котором приведены схемы формообразования каждого их изучаемых профилей.

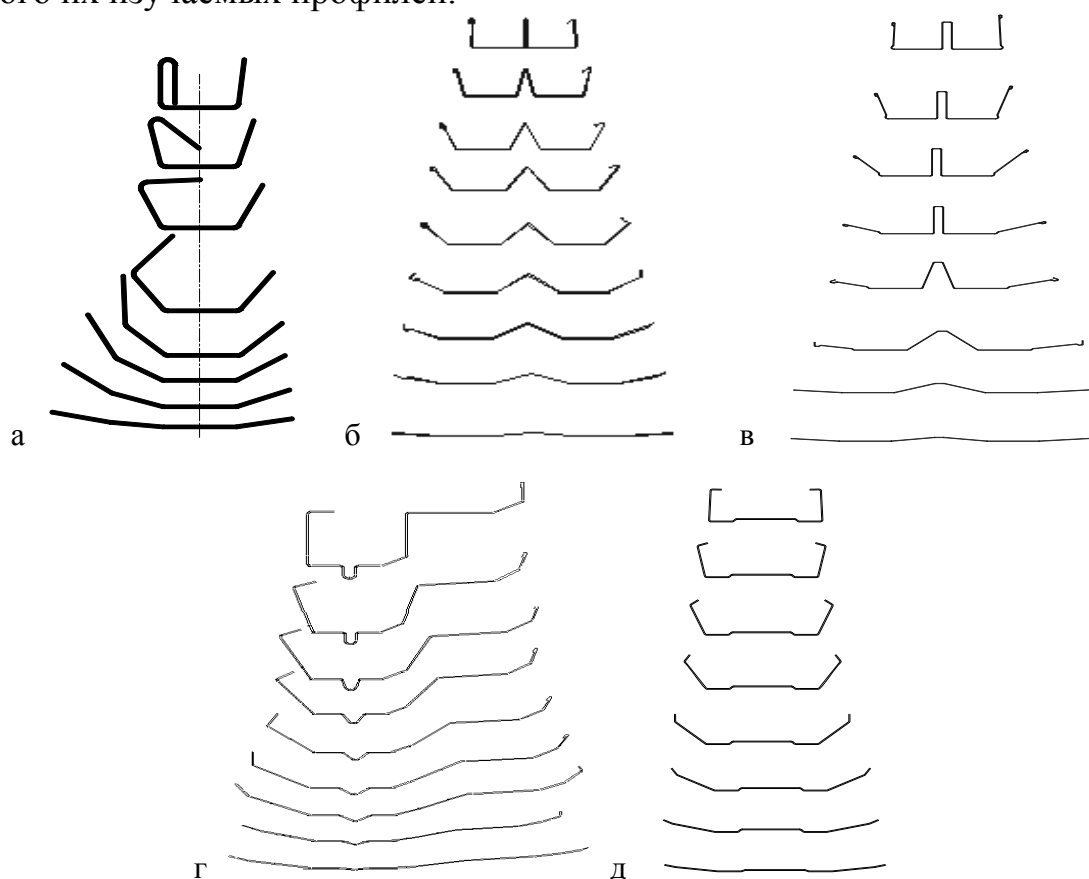


Рис. 3.17. Схемы формообразования профилей с отбортовками: а – армирующего профиля $40,5 \times 27,5 \times 1,5$ мм; б – авиационного профиля $30 \times 77,5 \times 0,7$ мм; в – авиационного профиля $89 \times 45 \times 0,6$ мм; г – армирующего профиля $77 \times 30 \times 0,7$ мм; д – армирующего профиля $200 \times 80 \times 2,0$ мм

На каждом переходе протяженность ЗПП измеряли с помощью специального проходного калибра и металлической линейки, смонтированной на специальной стойке. Замеры осуществлялись с точностью до 1 мм по линейке с миллиметровой шкалой при использовании ориентирующего металлического угольника. Штангенциркулем фиксировали ширину профиля в зоне стабилизации непосредственно за парой роликов предшествующего перехода зажимным винтом и перемещали штангенциркуль вперед до появления зазора, что соответствовало отметке на полке профиля, которую наносили карандашом с толщиной стержня 0,5 мм. Схема измерений приведена на рис. 3.8. При получении расчетных значений ЗПП из схемы формообразования на каждом переходе выделяли подгибаемые полки с отбортовкой, в среде «Компас-3D V9» и утилитой «МЦХ» получали значение 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 (2.65) с предварительным определением углов подгибки соответствующих полок по переходам на основе схемы формообразования.

На рис. 3.19 приведены схемы разбиения на составляющие элементы для каждого из профилей.

В табл. 3.9 – 3.13 приведены расчетные и экспериментальные значения протяженности зоны плавного перехода для профилей, представленных табл. 3.1.

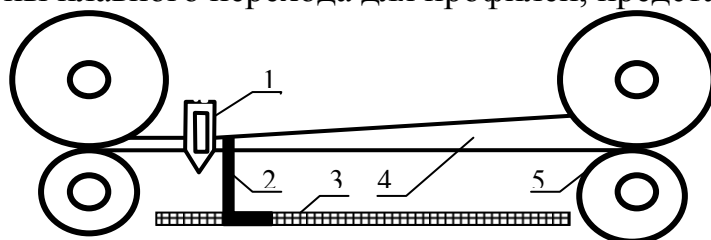


Рис. 3.18. Схема измерения протяженности зоны плавного перехода:
1 – штангенциркуль; 2 – угольник; 3 – линейка; 4 – профиль; 5 – ролик

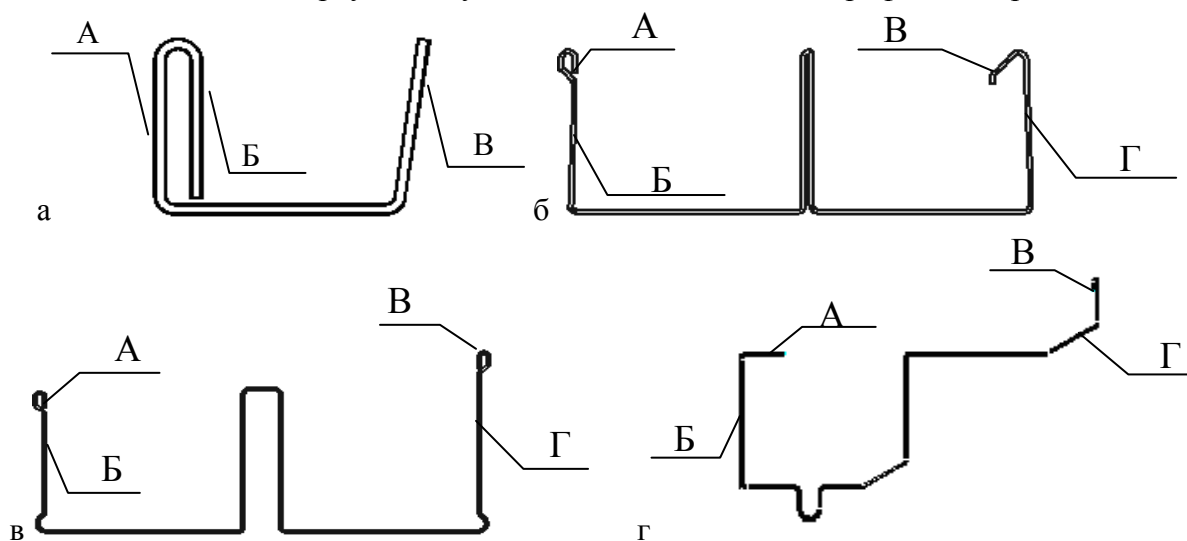


Рис. 3.19. Схемы разбиения профилей на составляющие элементы: а – армирующего профиля 40,5×27,5×1,5 мм; б – авиационного профиля 30×77,5×0,7 мм; в – авиационного профиля 89×45×0,6 мм; г – армирующего профиля 77×30×0,7 мм

Таблица 3.9

Исследование ЗПП армирующего профиля 40,5×27,5×1,5 мм

№	Параметр	Номер перехода								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	$J_p, \text{мм}^4$ (А)	18196	18281	18364	18444	18648	18980	19230	19458	
2	$J_p, \text{мм}^4$ (В)	11109								
3	Исходная толщина, мм	1,5								
4	Эквивалентная толщина лев. полки (А)	2,62	2,64	2,65	2,66	2,69	2,74	2,77	2,8	
5	Эквивалентная толщина прав. полки (В)	1,6								
6	Протяженность зоны плавного перехода (А)	Расчетная	30,82	30,68	30,62	30,58	30,39	30,13	29,93	29,79
		Экспериментальная	35	36	34	35	35	34	33	35
8	Протяженность зоны плавного перехода (В)	Расчетная	51,8	55,16	55,16	55,16	55,16	51,8	51,8	51,8
		Экспериментальная	80	81	79	80	78	77	75	73
9	ЗПП периферийного элемента (Б)	Расчетная	41,92	60,16	62,8	62,8	86,08	87,9	76,48	100
		Экспериментальная	62	74	78	80	106	111	94	130

Таблица 3.10

Исследование ЗПП авиационного профиля 30×77,5×0,7 мм

№	Параметр	Номер перехода									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	$J_p, \text{мм}^4 \text{ (Б)}$	9955	9495	9085	8769	8416	8246	8155	8063	7937	
2	$J_p, \text{мм}^4 \text{ (Г)}$	11947	11582	11597	10971	10065	9251	9151	9050	8912	
3	Исходная толщина, мм	0,7									
4	Эквивалентная толщина (Б)	0,7	0,73	0,9	1,08	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	
5	Эквивалентная толщина (Г)	0,69	0,73	0,75	0,96	1,27	1,18	1,18	1,18	1,19	
6	ЗПП полки (Б)	Расчетная	67,55	94,64	75,93	62,3	79,12	62,39	61,98	61,69	67,68
		Эксперимент.	85	113	93	82	99	84	88	86	90
8	ЗПП полки (Г)	Расчетная	73,88	104,21	102,06	78,19	72,42	58,78	58,38	58,11	63,97
		Эксперимент.	96	130	131	98	95	79	80	77	86
9	ЗПП отбор- товки (А)	Расчетная	402,27	474,17	379,99	264,72	216,58	185,25	146,18	103,95	60,32
		Эксперимент.	380	450	400	310	254	220	178	146	112
10	ЗПП отбор- товки (В)	Расчетная	453,16	519,38	445,57	269,08	212,73	177,6	135,39	91,64	52,47
		Эксперимент.	420	483	475	385	320	295	256	198	127

Таблица 3.11

Исследование ЗПП авиационного профиля 89×45×0,6 мм

№	Параметр		Номер перехода							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Jp, мм ⁴ (Б)		11176	11176	10449	10340	10445	11353	11814	11923
2	Jp, мм ⁴ (Г)		22438	22438	21444	21356	21546	23005	23731	23890
3	Исходная толщина, мм		0,6							
4	Эквивалентная толщина полки (Б)		0,6	0,6	0,79	0,85	0,84	0,84	0,83	0,831
5	Эквивалентная толщина полки (Г)		0,6	0,6	0,76	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
6	Протяженность ЗПП полки (Б)	Расчетная	82,88	32,41	61,31	56,85	57,57	172,03	158,41	127,07
		Экспериментальная	105	68	86	75	81	145	130	100
8	Протяженность ЗПП полки (Г)	Расчетная	115,19	45,05	89,2	85,46	86,18	254,18	232,78	186,35
		Экспериментальная	136	88	120	134	140	260	268	225
9	Протяженность ЗПП (А)	Расчетная	7,99	3,13	1,3	1,12	2,54	7,24	6,5	5,19
		Экспериментальная	23	15	18	14	20	25	24	24
10	Протяженность ЗПП (В)	Расчетная	8,09	3,17	1,41	1,28	2,92	8,30	7,47	5,96
		Экспериментальная	16	12	10	11	10	15	18	13

Таблица 3.12

Исследование ЗПП армирующего профиля 77×30×0,7 мм

№	Параметр	Номер перехода									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	$J_p, \text{мм}^4$ (А)	244	241	238	2318	227	222	221	217	215	
2	$J_p, \text{мм}^4$ (Г)	3890	38281	37858	3601	3537	3504	3466	3258	3116	
3	Исходная толщина, мм	0,7									
4	Эквивалентная толщина полки (Б)	0,702	0,71	0,71	0,72	0,73	0,74	0,744	0,75	0,76	
5	Эквивалентная толщина полки (Г)	0,7663	1,86	2,82	3,298	3,79	4,47	4,819	5,38	6,21	
6	Протяженность ЗПП (Б)	Расчетная	245,34	244,46	243,8	242,1	240,4	239,05	238,33	237,1	235,65
		Экспериментальная	280	286	290	285	280	290	300	289	295
8	Протяженность ЗПП (Г)	Расчетная	111,44	91,37	67,95	56,66	50,00	46,07	44,32	42,96	39,05
		Экспериментальная	150	144	130	132	124	111	105	102	106
9	Протяженность ЗПП (А)	Расчетная	152,44	140,13	115,9	93,57	80,52	130,27	146,32	152,9	163,77
		Экспериментальная	210	198	154	130	134	156	169	173	195
10	Протяженность ЗПП (В)	Расчетная	88,54	65,92	53,28	46,14	42,54	39,08	36,69	35,57	34,57
		Экспериментальная	120	102	98	89	85	64	67	60	63

Таблица 3.13

Исследование ЗПП авиационного профиля 200×80×2

№	Параметр		Номер перехода							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Jp, мм ⁴ (полка)		568543	573762	581236	582769	577840	570938	561241	546521
2	Исходная толщина, мм		2							
3	Эквивалентная толщина полки		2,02	2,12	2,13	2,28	2,5	2,7	2,9	3,2
4	Протяженность ЗПП (полки)	Расчетная	242	214,98	331,91	310,54	282,04	206,5	189,33	188,13
		Экспериментальная	280	268	356	340	320	284	253	245
5	Протяженность ЗПП отбортовки	Расчетная	34,652	33,716	33,788	69,167	52,431	44,931	44,314	41,245
		Экспериментальная	56	55	52	74	63	59	60	54

Сравнение экспериментальных и расчетных значений протяженности ЗПП для армирующего профиля (рис. 3.19,а) показывает, что для левой их полки отличие не превышает 18%, а для правой – 25%. Расхождение расчетных и экспериментальных данных для периферийного элемента достигает 30%, что обусловлено, по-видимому, достаточно большим криволинейным участком между периферийным элементом и левой полкой профиля. Что касается правой полки, то здесь отличия экспериментальных и расчетных значений объясняются несбалансированной схемой формовки (отсутствием компенсации деформаций элементов, расположенных слева и справа от базового элемента). Обычно компенсация обеспечивается поворотом сечения или различием углов подгибки элементов, расположенных по обеим сторонам от базового элемента.

Анализ других соотношений в табл. 3.10 – 3.12 показывает, что в среднем расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 17%, хотя имеются случаи, где та же характеристика превышает 30%. Эти расхождения вызваны, в основном, процедурами расчета эквивалентной толщины элемента. В частности, как показали более тщательные исследования, применение центробежного момента инерции вместо полярного момента может дать результаты, более приближенные к экспериментальным значениям.

В целом модель ЗПП может быть использована для расчетов при разработке технологии для предотвращения переформовки заготовки на основе неравенства:

$$L \leq L_M, \quad (3.6)$$

где L_M – межклетьеовое расстояние профилировочного станка.

3.6. Исследование влияния отбортовок на протяженность ЗПП [132]

Для практического использования зависимости влияния отбортовок на протяженность ЗПП были проведены экспериментальные исследования на основе ПФЭ. Объект исследования и факторы эксперимента представлены на рис. 3.5 в табл. 3.13 соответственно.

Таблица 3.13

План и результаты ПФЭ 2^3

№	Основные столбцы			Вспомогательные столбцы				Выход процесса				Дисп.
	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3	$X_1X_2X_3$	y_1	y_2	y_3	y_{cp}	s^2
	g	s	α									
1	-	-	-	+	+	+	-	136	138	135	136,33	2,3333
2	+	-	-	-	+	-	+	170	175	170	171,67	8,3333
3	-	+	-	-	-	+	+	92	95	90,	92,333	6,3333
4	+	+	-	+	-	-	-	120	123	125	122,67	6,3333
5	-	-	+	+	-	-	+	160	158	163	160,33	6,3333
6	+	-	+	-	-	+	-	194	190	195	193,00	7,0000
7	-	+	+	-	+	-	-	125	128	126	126,33	2,3333
8	+	+	+	+	+	+	+	155	160	158	157,67	6,3333

Частные зависимости протяженности ЗПП для различной ширины отбортовки приведены на рис. 3.20.

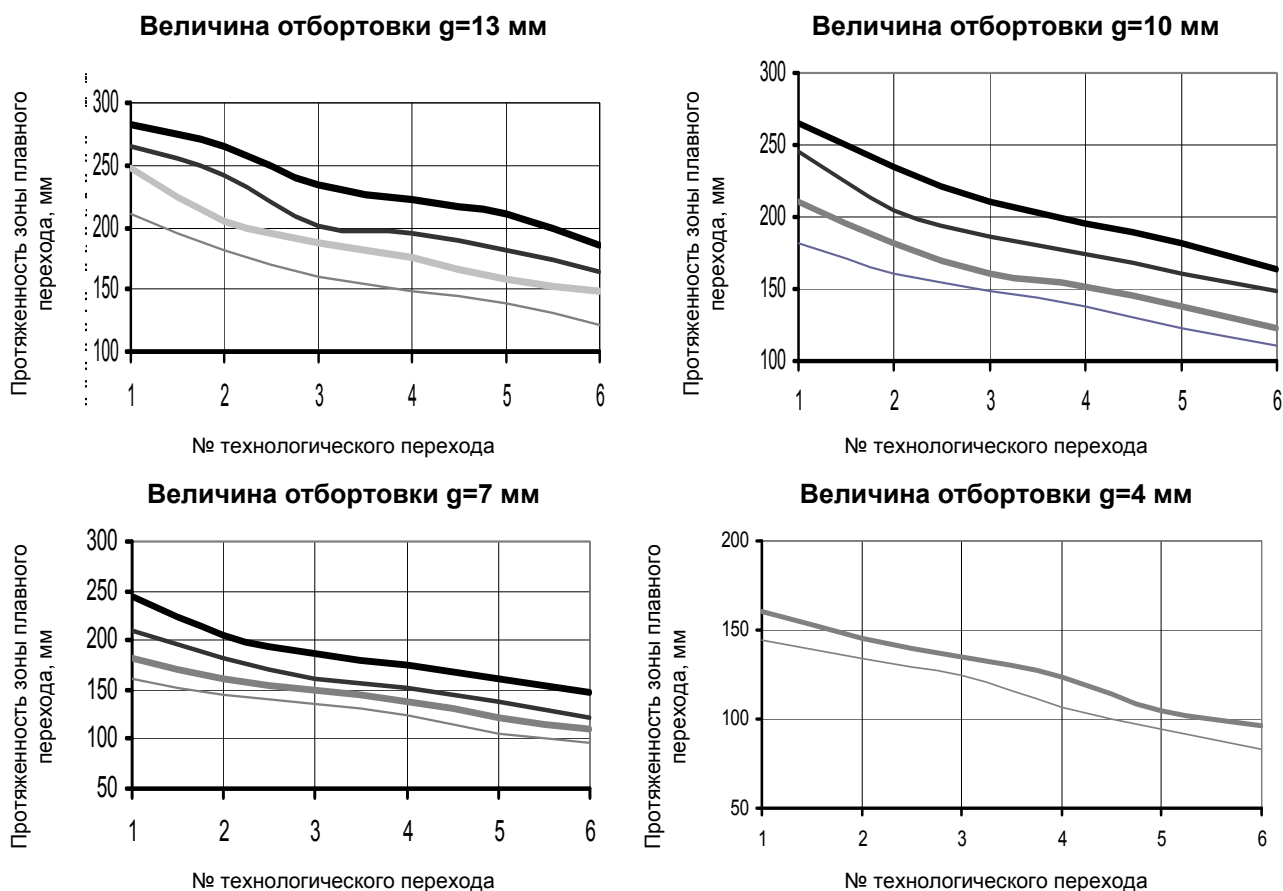


Рис. 3.20. Изменение протяженности зоны плавного перехода полки, несущей отбортовку: — s=0,7 мм — s=1,0 мм — s=1,2 мм — s=1,5 мм (s – толщина материала заготовки)

План типа 2^3 позволяет получить отдельные оценки коэффициентов регрессии для уравнения вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3.7)$$

Коэффициенты регрессии определяли по известным формулам теории полного факторного эксперимента [90]. В процессе расчета проверяли дисперсию по критерию Кохрена, адекватность модели по критерию Фишера, рассчитывали доверительный интервал $\Delta b_i = \pm 0,15$ и исключали коэффициенты меньше данного значения.

В результате получили следующую зависимость протяженности ЗПП от ширины полки, толщины заготовки и угла подгибки:

$$y = 145,04167 + 16,20833x_1 - 20,29167x_2 + 14,29167x_3 - 0,79167x_1x_2 + 2,95833x_2x_3. \quad (3.8)$$

Уравнением (3.8) можно пользоваться при разработке технологии для оценки протяженности ЗПП в пределах варьирования релевантных параметров.

3.7. Некоторые вопросы устойчивости деформирования профилей с отбортовками [126, 140, 141]

Ряд вопросов, связанных с дефектами гнутых профилей с отбортовками, рассматривался в разд. 1.4 работы. На рис. 3.21 приведены образцы профилей, показывающие некоторые виды пластической неустойчивости деформирования.

Неустойчивость пластического деформирования возникает обычно при явных нарушениях общих принципов проектирования технологического оснащения для реализации технологии МИД. Общие рекомендации по разработке схем формообразования и технологического оснащения приведены в работе [4].

Локальная потеря устойчивости элементов профиля при деформировании чаще всего наступает при завышенных углах подгибки и при нарушении режимов формообразования. Представленная выше модель зоны плавного перехода позволяет вычислять предельные углы подгибки, не приводящие к переформовке заготовки, и тем самым устранить предпосылки к возникновению некоторых дефектов потери устойчивости. Тщательный подбор режимов формовки профиля также значительно снижает риск возникновения неустойчивости деформирования. Авторами работы проведены первоначальные экспериментальные исследования по выявлению характера локальной потери устойчивости элементов профилей при аксиальном сжатии (моделирование «набегания» продольных деформации при профилировании) (рис. 3.22).

Приведенные на рис. 3.22 виды потери устойчивости достаточно разнообразны и зависят преимущественно от конфигурации сечения профиля. Однако в реальных условиях профилирования потерю устойчивости определяют не только статические, но и динамические характеристики процесса, а также распределение параметров напряженно-деформированного состояния. Отсюда следует, что вопросы исследования устойчивости



Изгиб с кручением



Излом



Кромковая волнистость



Поперечный пластический изгиб

Рис. 3.21. Некоторые виды потери устойчивости деформирования профилей с отбортовками



Рис. 3.22. Виды локальной потери устойчивости элементов профилей с отбортовками при аксиальном сжатии

пластического деформирования при производстве профилей с элементами жесткости представляют собой отдельную и важную тему, *выходящую* за рамки данной работы.

3.8. Выводы

Показано, что изменение толщины угловых зон профиля на различных переходах существенно зависит от вида нагружения (растяжения или подсадки), что подтверждает данные теоретической модели (отклонения результатов не превышают 6%).

Построенная на основе ПФЭ регрессионная модель устанавливает зависимость изменения толщины заготовки от размеров отбортовки, толщины профиля и подгибки несущей полки. Расхождение значений изменения толщины заготовки в угловых зонах, полученных по теоретической модели и по регрессионной модели, не превышает 14%. Регрессионная модель может быть рекомендована к использованию для разработки технологии производства профилей с отбортовками, размеры которых находятся в диапазоне варьирования факторов при проведении ПФЭ.

Исследованием влияния промежуточных радиусов кривизны заготовки на утонение заготовки и контактные напряжения, влияющие на сохранность покрытия, установлено, что применение плавно изменяющихся радиусов изгиба заготовки по переходам в 1,5 – 2 раза снижает значения утонений заготовки и уровень контактных напряжений.

Показано, что аналитическая модель протяженности ЗПП для гладких подгибаемых полок пригодна для расчета протяженности ЗПП полок, несущих отбортованную часть, при использовании метода локальных жесткостей. Отличие экспериментальных и расчетных значений протяженности ЗПП лежит в среднем в пределах 17%.

Регрессионная модель влияния отборонок на протяженность ЗПП устанавливает зависимость последней от ширины отбортовки, толщины заготовки и угла подгибки несущей полки и рекомендуется к использованию для разработки технологии изготовления профилей с отбортовками, размеры которых находятся в диапазоне варьирования факторов при проведении ПФЭ.

Постановочными исследованиями в области устойчивости пластического деформирования профилей с элементами жесткости, выходящими за рамки задач данной книги, установлено, что из множества влияющих факторов определяющим фактором неустойчивости деформирования является угол подгибки, причем характер неустойчивости в значительной степени определяется геометрией сечения профиля.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ

4.1. Проработка профиля на технологичность [142]

Под технологичностью детали понимают такое сочетание основных элементов ее конструкции, которое наиболее просто обеспечивает ее изготовление и высокое качества эксплуатации.

При проектировании конструкций с использованием экономичных гнутых профилей конструктор стремится выбрать наиболее рациональные формы этих профилей с точки зрения функциональности конструкции, технологичности при монтаже. Также конструктор должен обеспечить наилучшие эксплуатационные качества и предусмотреть наиболее простое, экономичное их изготовление.

С чисто технологической точки зрения для создания технологии изготовления отдельного профиля важными являются исходные данные (форма профиля, параметры его поперечного сечения, материал, требования к качеству профиля), представленные в структурированном виде на рис. 4.1.

Общие требования технологичности производства профильных деталей типовой номенклатуры, подлежащих изготовлению методами интенсивного формообразования, формулируются следующим образом [142]:

- механические свойства листового материала должны обладать временным сопротивлением разрыву до 390 МПа, относительное удлинение должно быть не менее 6%;

- необходимо стремиться к снижению металлоемкости конструкции детали за счет применения ребер жесткости, отбортовок и т. п.;

- следует уменьшать набор применяемых толщин листового материала (предпочтительный ряд толщин: 0,6; 0,8; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5 мм);

- конструкция профиля открытого типа предпочтительнее, чем конструкция профиля закрытого и полужакрытого типов (с точки зрения изготовления);

- допуски на размеры поперечного сечения профилируемых деталей должны соответствовать точности процесса профилирования (9 – 14-й квалитет). Допуск на длину детали нецелесообразно назначать менее ± 2 мм;

- минимально допустимые внутренние радиусы гибки для пластичных низкоуглеродистых сталей составляют, как правило, $0,5s$, и назначать их следует только при конструктивной необходимости;

- минимально допустимая высота отбортовок составляет, как правило, $2s$, и назначать минимальные значения следует только при конструктивной необходимости (для традиционного профилирования высота отбортовок назначается не менее 4 толщин);

- прочность покрытия должна допускать изгиб заготовки на заданный относительный радиус изгиба (обычно не менее единицы);

- при наличии перфорации в заготовках должны выполняться специальные условия согласно работе [143].



Рис. 4.1. Исходные данные профиля для анализа технологичности

При конструировании детали не следует необоснованно назначать допуски повышенной точности, так как это удорожает стоимость изготовления инструмента.

Конструкция детали и требования к реализации процесса ее производства определяют технологию и применяемое оборудование. При этом профиль с отбортовками подлежит анализу на предмет его технологичности. При выборе оптимального варианта изготовления надлежит исходить из четырех аспектов:

- 1) при оценке возможности изготовления нужно опираться на несколько критериев (массовость производства, возможность реализации на том или ином оборудовании);
- 2) скорость профилирования должна соответствовать 6 – 20 м/мин;
- 3) минимальные экономические затраты на изготовление детали (простой технологический процесс, применение неквалифицированного персонала, минимальные затраты материальных средств и времени на изготовление инструмента и др.);
- 4) безопасная работа человека при изготовлении, наладке и работе инструмента или детали (применение дорогостоящего, но более безопасного оборудования, установление режима работы и др.).

Обычно при выборе способа изготовления больше обращают внимание на третий пункт, то есть минимальные экономические затраты на изготовление данной детали. Не менее важным является такой фактор, как серийность. Так, при массовом и многосерийном производстве возможно применение дорогостоящего, но быстродействующего оборудования, так как экономические затраты на одну деталь окупаются быстро. При мелкосерийном производстве применение такого оборудования нерационально, поэтому применяют более дешевое и менее быстродействующее оборудование.

4.2. Выбор схемы и режимов формообразования

Режим формообразования имеет решающее значение для обеспечения требуемого качества профиля при минимальных затратах. Он характеризуется углами подгибки профиля за проход и радиусами кривизны мест изгиба профилируемой заготовки.

Выбор схемы формообразования (т. е. выбор переходных форм профиля) необходимо производить таким образом, чтобы процесс перехода одной формы сечения профиля к другой проходил без дополнительных деформаций и лишних затрат энергии. Дополнительные деформации (при переформовке заготовки) не имеют прямого отношения к получению формы заданного сечения. Кроме того, следует избегать перетекания материала через углы (утяжка), а также недопустимы знакопеременные подгибки (подгибание и последующее разгибание), которые вызывают появление надломов, вмятин и других дефектов.

Оптимальный режим формообразования назначается с учетом параметров напряженно-деформированного состояния и механических свойств металла, размеров заготовки и элементов профиля, системы калибровки валков и технологического процесса профилирования.

4.2.1. Выбор оси профилирования

Рациональность схемы формообразования, правильное расположение профиля в валках во многом зависят от выбора основной оси (или базового элемента) профиля b_0 (рис. 4.2). Основная ось обеспечивает устойчивость полосы в процессе профилирования, уменьшая возможность ее продольного изгиба или скручивания [4, 139].

У симметричных профилей основная ось делит ширину заготовки пополам и проходит через середину базового элемента (дно) формируемого профиля. У несимметричных профилей при определении оси профилирования приходится учитывать ряд факторов, основным из которых является расположение профиля в основных фор-

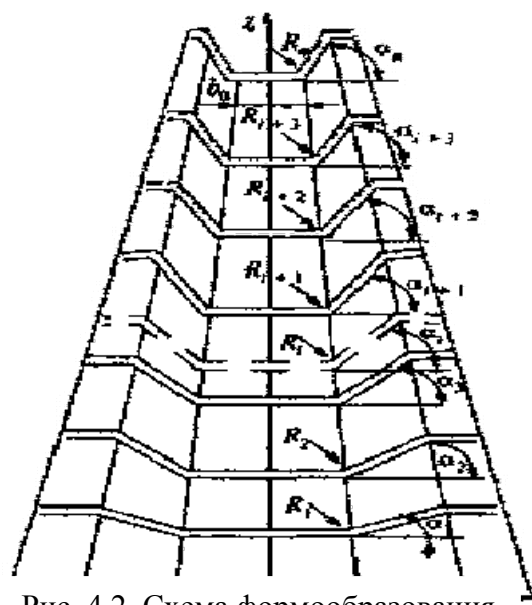


Рис. 4.2. Схема формообразования корытного профиля

мующих валках [144], а также привязку оси профилирования к базовому элементу.

4.2.2. Выбор количества переходов

В МИД процедура определения числа переходов для профилей типовой номенклатуры формализована [87]. В случае сложных многоэлементных профилей приходится обращаться к банку технических решений разработчиков с учетом особенностей МИД, одной из которых является формовка окончательных радиусов уже на первом переходе при жестких режимах подгибки элементов. Это обусловлено рядом причин:

– равномерностью механических свойств по сечению заготовки, что обеспечивает наибольшую утяжку металла без утонения полки (далее угловые зоны профиля упрочняются, что препятствует распространению пластических деформации по сечению профиля);

– отсутствует накопленная деформация, что позволяет подгибать на большие углы, чем в последующих переходах.

За первый переход стараются получить профиль с ярко выраженными зонами и радиусами, которые соответствуют радиусам готового профиля.

Последний переход обычно соответствует чертежу готового профиля. В некоторых случаях при проектировании простых профилей учитывают пружинение, которое зависит от толщины металла и радиуса гибки. Обычно угол пружинения составляет $(2 - 5)^\circ$.

Для профилей сравнительно простых конфигураций переходы строят от последнего перехода лучевым проецированием (рис. 4.3).

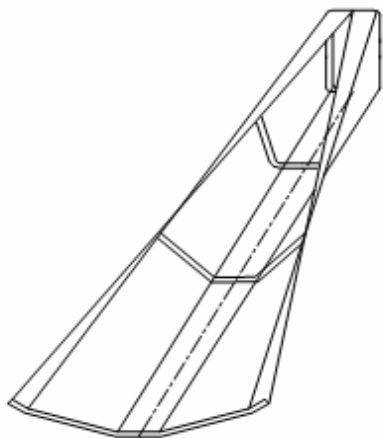


Рис. 4.3. Построение переходов

Для сложных профилей используется функциональная зависимость (кривая линия).

По предельным значениям углов подгибки элементов за один переход устанавливают необходимое число клеток для формовки профиля данного типоразмера. Вообще же, схема формообразования и число переходов являются предметом ноу-хау на предприятиях-разработчиках технологий интенсивного деформирования.

4.2.3. Влияние скоростного режима

Одной из характеристик МИД является ограничение на максимальную скорость профилирования, что в немалой степени связано со скольжением. Наибольшее скольжение проявляется в местах наибольшей разности скоростей: во внутренних угловых зонах профиля 1 и наружных предторцевых зонах профиля 2 (рис. 4.4). Неравномерность скоростей сопровождается различием и контактных напряжений с обеих сторон заготовки. Скольжение существенно

зависит от основных диаметров роликов [17]. Назначение основного диаметра, проходящего по той или иной плоскости калибра, зависит от сложности профиля и его габаритных размеров.

При простом профиле и относительно толстом материале основной диаметр назначают по центрам масс. При сложном и тонком профиле основной диаметр назначают по нижней точке профиля на всех переходах, что также характерно для метода интенсивного деформирования.

Различие в диаметрах роликов по дну профиля и по краям профиля может быть существенным (особенно для профиля с широкими полками). Если учесть, что скорость профиля, как правило, соответствует линейной скорости «дна» нижнего ролика, то величина скольжения в зонах 1 и 2 (см. рис. 4.4) может достигать (50 – 70)%.

Основные пути уменьшения скольжения:

- уменьшение скорости профиля;
- уменьшение угловой скорости верхнего вала на (10 – 30)%;
- увеличение диаметров нижнего валка;
- применение отдельных неприводных вставок в местах наибольшего скольжения (цилиндрически бурты, криволинейные части верхних валков).

4.2.4. Расчет технологических переходов (калибровка роликов)

При проектировании инструмента особое внимание следует уделять выбору системы калибровки, схемы расчетов калибра, принципа формовки заготовки. Калибровка валков — основа технологического процесса профилирования, цель которой получить из плоской исходной заготовки профиль заданной конфигурации.

Рациональность калибровки определяется [124]:

- возможностью формовки профиля требуемой конфигурации за наименьшее количество технологических переходов;
- обеспечением точности выполнения формы и размеров поперечного сечения профиля;
- учетом возможных дефектов и предупреждением их появления в результате применения соответствующих приемов и способов;
- простой конфигурацией калибров, не препятствующей протеканию деформаций и поперечному перемещению металла при формоизменении полосы;

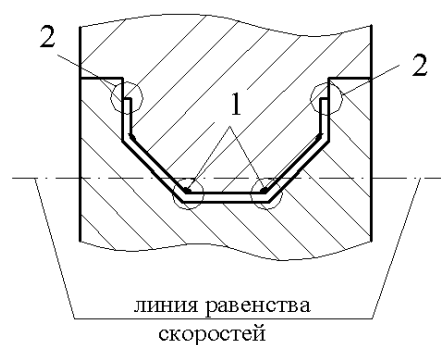


Рис. 4.4. Характерные зоны с наибольшим скольжением:
1 – внутренние формируемые углы изгиба профиля;
2 – предторцевые места профиля

- правильным сочетанием формы профиля, расположения калибра в валках и режима профилирования;
- обеспечением стабильного захвата полосы вращающимися профильными валками и точного направления ее при заходе в формующий калибр;
- повышенной износостойкостью валков как в результате учета при их изготовлении минусовых допусков на линейные размеры и радиусы закруглений мест изгиба на профилях, так и в результате правильной компоновки элементов валков;
- простотой и точностью настройки валков стана.

Как указано в работах [4, 17, 87, 24], основные системы калибровки можно разделить на 5 групп:

- 1) последовательная калибровка роликов, при которой подгибка элементов профиля осуществляется от оси профиля с последующей формовкой периферийных элементов;
- 2) последовательная калибровка роликов, при которой подгибка элементов профиля начинается с краевых участков, с последующей формовкой срединных участков;
- 3) параллельная калибровка роликов, при которой формообразованию подвергаются все элементы сечения профиля одновременно;
- 4) комбинированная калибровка роликов, при которой профилирование начинается одновременной формовкой всех или некоторых участков заготовки с последующей доформовкой отдельно каждого участка;
- 5) калибровка роликов с осадкой волнообразной заготовки.

Данные системы калибровок имеют свои достоинства и недостатки. Метод интенсивного деформирования предполагает использование параллельной системы калибровки роликов, т. к. интенсификация процесса связана с уменьшением количества переходов формообразования, кроме того, максимального экономического эффекта можно достичь только при использовании параллельной системы калибровки роликов.

Расчет калибров следует производить в направлении от готового профиля к исходной заготовке (против хода профилирования). Данный способ, в отличие от способа расчета от заготовки к готовому профилю (по ходу формовки), позволяет исключить значительные погрешности при расчете калибров и связанную с ними переформовку металла в местах изгиба и перетяжку металла из одного элемента профиля в другой.

Выбор принципа формовки профилируемого металла связан с особенностями течения металла в уголкового зоне. На настоящий момент известны три способа формовки [17, 113]:

- 1) формовка по кривой постоянного радиуса, равного внутреннему радиусу гибки готового профиля, при этом приращение криволинейного участка происходит за счет периферийного элемента;

2) формовка по кривой постоянного радиуса, равного внутреннему радиусу гибки готового профиля, при этом приращение криволинейного участка происходит за счет донной части профиля;

3) формовка по третьему способу заключается в постепенном уменьшении радиуса изгиба до внутреннего закругления готового профиля.

Однако данные способы формовки обладают рядом недостатков:

– способы 1 и 2 не учитывают особенности течения металла в уголковогой зоне;

– способы 1 и 2 неприемлемы для изготовления сложных профилей;

– способы 3 трудоемок в расчете калибров и их изготовлении, кроме того, этот способ связан с переформовкой уголковогой зоны с большего радиуса на меньший, что в ряде случаев приводит к нарушению покрытия при его наличии.

При реализации МИД рекомендуется применять другую систему формовки, которая характеризуется гибкой по кривой постоянного радиуса, равного радиусу внутреннего закругления готового профиля. При этом приращение криволинейного участка происходит равномерно за счет уменьшения длины элементов профиля, прилегающих к данной уголковогой зоне. Исключение составляют элементы, отгибаемые на угол $\alpha > 90^\circ$.

Проектирование калибровок валков для изготовления гнутых профилей представляет собой поэтапный расчет технологических параметров процесса:

1) расчет необходимой ширины заготовки; разработка схемы формообразования профиля; определение режима формовки — углов подгибки элементов профиля и радиусов закруглений мест изгиба по переходам;

2) конструирование рабочих валков и технологической оснастки, включающей вертикальные ролики, направляющие и проводящие устройства;

3) непосредственный расчет рабочего инструмента.

4.3. Разработка профилирующей оснастки

4.3.1. Классификация калибров

Всю оснастку, устанавливаемую на профилегибочном станке (рис. 4.5) можно разделить на: 1) предварительную оснастку; 2) формующую оснастку; 3) промежуточную оснастку; 4) правильную оснастку.

Предварительная оснастка предназначена для первоначальной подгибки заготовки и используется для лучшего захода заготовки в первый калибр.

Применяют два типа предварительной оснастки.

1. Направляюще-профилирующие ролики с вертикальными осями, позволяющие осуществлять формообразование за счет направленной потери устойчивости при торцевом (поперечном) сжатии заготовки (рис. 4.6). Благодаря широкому диапазону регулировки межцентрового расстояния в нулевой клетки станка и отсутствию верхнего формующего инструмента ролики являются ши-

роко универсальными и могут быть использованы при формообразовании широкой номенклатуры профилей с различной шириной и толщиной заготовки.

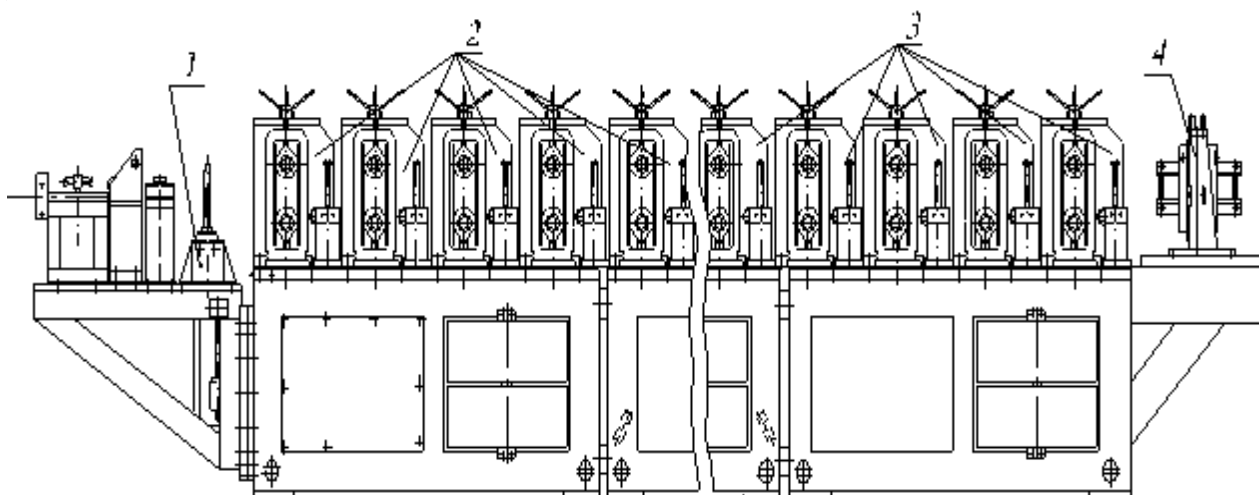


Рис. 4.5. Расположение оснастки на профилегибочном станке:

1 – предварительная; 2 – формирующая; 3 – промежуточная; 4 – правильная

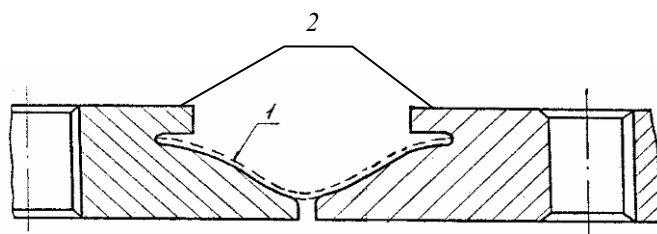


Рис. 4.6. Ролики предварительной подгибки:

1 – заготовка; 2 – горизонтальные формирующие ролики

Как правило, предварительные ролики являются неприводными.

Формирующая оснастка – основная оснастка, предназначенная для непосредственного формообразования профиля. Представляет собой комплекты формирующих роликов, устанавливаемые на валы (верхний и нижний) рабочих клеток станка. Калибры формирующих роликов соответствуют переходам профилирования. Особенностью рабочих калибров является замкнутый по всему периметру рабочий контур (закрытый калибр) на всех переходах. Замыкание рабочего контура обеспечивается специальными конструктивными элементами двух типов: *буртами* (рис. 4.7, а), применяемыми при горизонтальном расположении краевых элементов профиля, и *уступами* – при их вертикальном расположении.

Равномерность боковых (вертикальных) зазоров в калибре, исключение возможности относительного смещения роликов в осевом направлении обеспечиваются соединением верхнего и нижнего роликов торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадкой «в замок» по Н7/н7. Нижний ролик при этом, как правило, является охватывающим базовым, верхний – охватываемым (рис. 4.7, а, в); исключение составляют ролики для профилей, крайние полки которых направлены вниз (рис. 4.7, б).

В отдельных случаях (при несимметричной форме профилей) соединение роликов в замок следует производить с помощью дополнительных элементов типа «паз-выступ» (рис. 4.7, в).

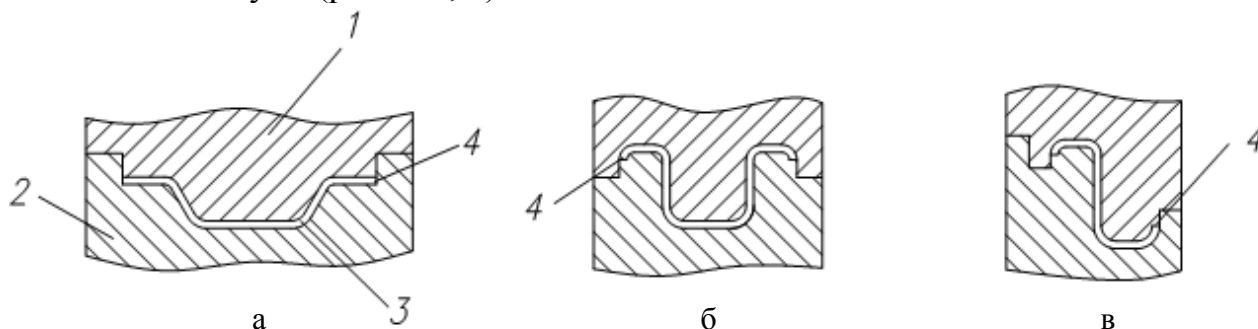


Рис. 4.7. Элементы роликовой формующей оснастки:
1 – верхний ролик; 2 – нижний ролик; 3 – роликовый калибр; 4 – бурт;

Для обеспечения точности размеров по сечению профиля следует в калибре роликов выдерживать равномерность и постоянство зазоров, как в осевом, так и в радиальном направлении. Для реализации данного условия при проектировании целесообразно предусмотреть базирование роликов друг по другу, как правило, верхнего ролика по нижнему ролику. Для этой цели в конструкциях роликов предусматривают базовые поверхности (рис. 4.8), фиксирующие заданную величину радиального зазора в калибре. В качестве баз рекомендуется использовать уступы и бурты роликов. Простановка размеров по ширине ролика осуществляется от технологической базы *Б* или торца калибра.

Диаметры формирующих роликов на всех переходах следует выбирать конструктивно, исходя их межцентрового расстояния, диаметров рабочих валов и глубины формовки (глубины «вреза»). При этом для достижения достаточной прочности роликов необходимо обеспечить в местах минимальной толщины в радиальном направлении запас материала не менее 5 – 10 мм (рис. 4.9).

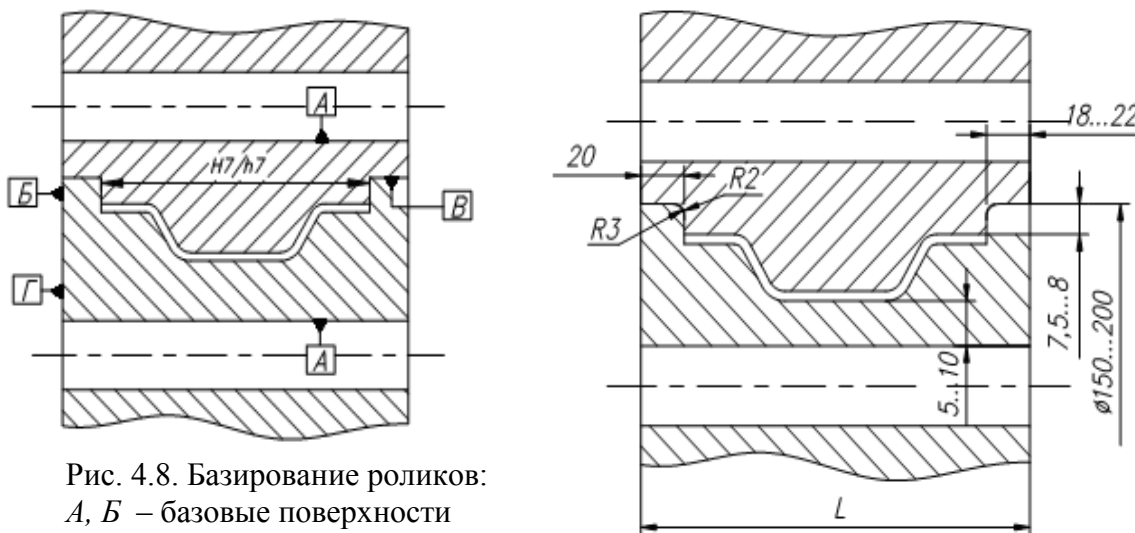


Рис. 4.8. Базирование роликов:
A, Б – базовые поверхности (направляющие базы); *В, Г* – установочные поверхности (опорные базы)

Рис. 4.9. Бурты и посадочные места роликов

Бурты охватывающих роликов представляют собой выступы высотой 7,5 – 8 мм и шириной 18 – 22 мм со скруглением по радиусу 3 мм. Размеры верхнего охватывающего ролика рассчитываем исходя из размеров нижнего ролика и межосевого расстояния. Радиус скругления по уступу и бурту верхнего ролика – 2 мм.

Авторами данной работы предложено иное решение по назначению скругления буртов (см. формулу (3.3) [138]).

Ширину левого (по направлению профилирования) бурта принимают 20 мм, а ширину правого бурта рассчитывают по ширине профиля. Для обеспечения постоянства расстояния оси профилирования до установочной базы станка предусматривают распорные втулки.

Промежуточная оснастка предназначена для предварительного формоизменения заготовки (полуфабриката) перед заходом ее в основной роликовый калибр.

Промежуточную оснастку применяют для получения сложных профилей при малом числе формирующих роликов, а также в качестве направляющих при изготовлении простых профилей. В качестве промежуточной оснастки применяют фильеры (рис. 4.10). При наличии на профиле углов более 90° в качестве промежуточной оснастки вводят вертикальные ролики (поз.1 рис. 4.11). Для удержания профиля изнутри вводят бронзовые фильеры поз. 2, 3.

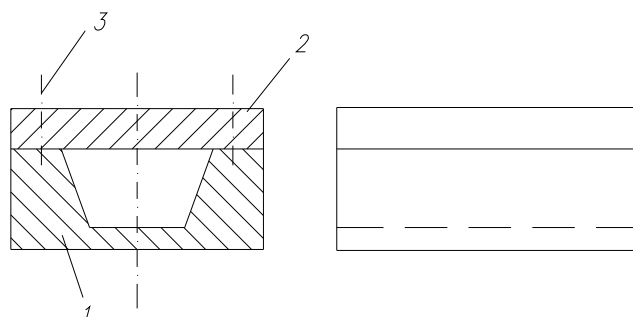


Рис. 4.10. Промежуточная фильера: 1 – нижняя часть фильеры; 2 – верхняя часть фильеры; 3 – крепление частей фильеры

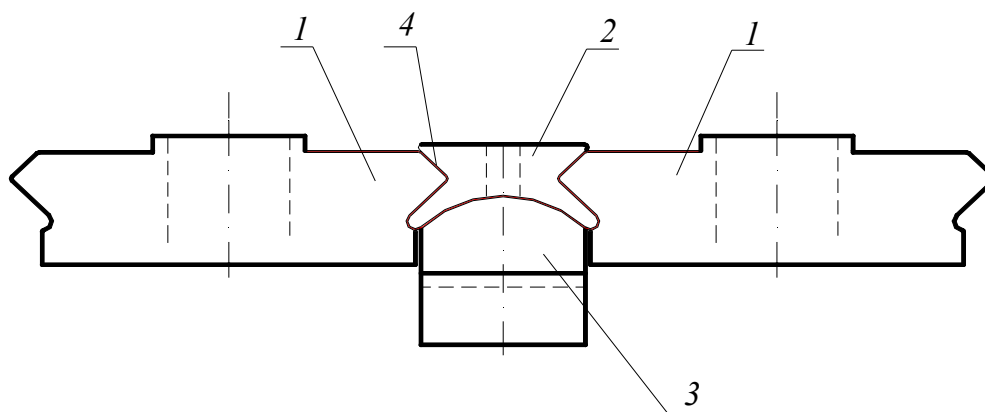


Рис. 4.11. Пары промежуточные 1 – ролики промежуточные; 2 – фильера верхняя; 3 – фильера нижняя; 4 – профиль

Калибр промежуточной оснастки может соответствовать калибру следующего основного калибра основного перехода или иметь средние размеры (средние углы подгибки между основными переходами).

Применение дополнительной оснастки должно быть по возможности ограниченным, поскольку усложняется настройка режимов процесса и увеличивается себестоимость изготовления профиля.

Правильная оснастка предназначена для окончательной калибровки профиля, устранения пружинения, устранения дефектов профиля (прогиба, саблевидности, скрутки). Оснастка состоит из правильных роликов (2...4) в зависимости от размеров и формы профиля (рис. 4.12).

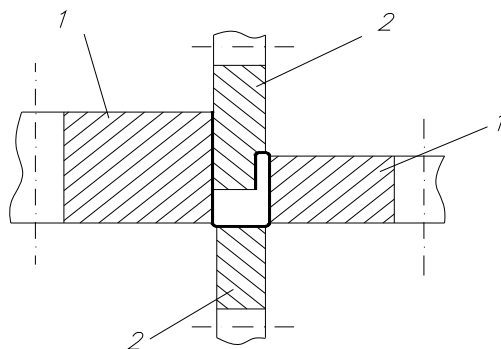


Рис.4.12. Правильная оснастка: 1 – правильные ролики вертикальные; 2 – правильные ролики горизонтальные

При использовании МИД правка профиля в правильном устройстве профилировочного станка является обязательной операцией.

4.3.2. Выбор формы и величины скругления буртов при изготовлении профилей с покрытием

Радиусы на буртах играют важную роль, поскольку от их величины зависит площадь контакта и, соответственно, величина контактных давлений, влияющих на сохранность покрытия.

Бурты охватывающих роликов следует проектировать в виде выступов толщиной 15 – 20 мм со скруглением по радиусу не менее 3 мм (рис. 4.13, а), либо в сочетании скругленного и наклонного прямолинейного участка (рис. 4.13, б). Размеры прямолинейных, сопряженных с верхним роликом участков буртов должны обеспечивать их перекрытие по высоте не менее 3 – 5 мм.

Для уменьшения контактных давлений следует использовать «скругления» по эллипсу с отношением главных осей $5/3$, при этом большая ось эллипса должна быть перпендикулярна к оси ролика, а малая ось должна быть параллельна оси ролика. При использовании такого вида скругления радиус кривизны в месте контакта по сравнению с рекомендуемым ранее радиусом 3 мм увеличивается в 2,2 – 2,7 раза.

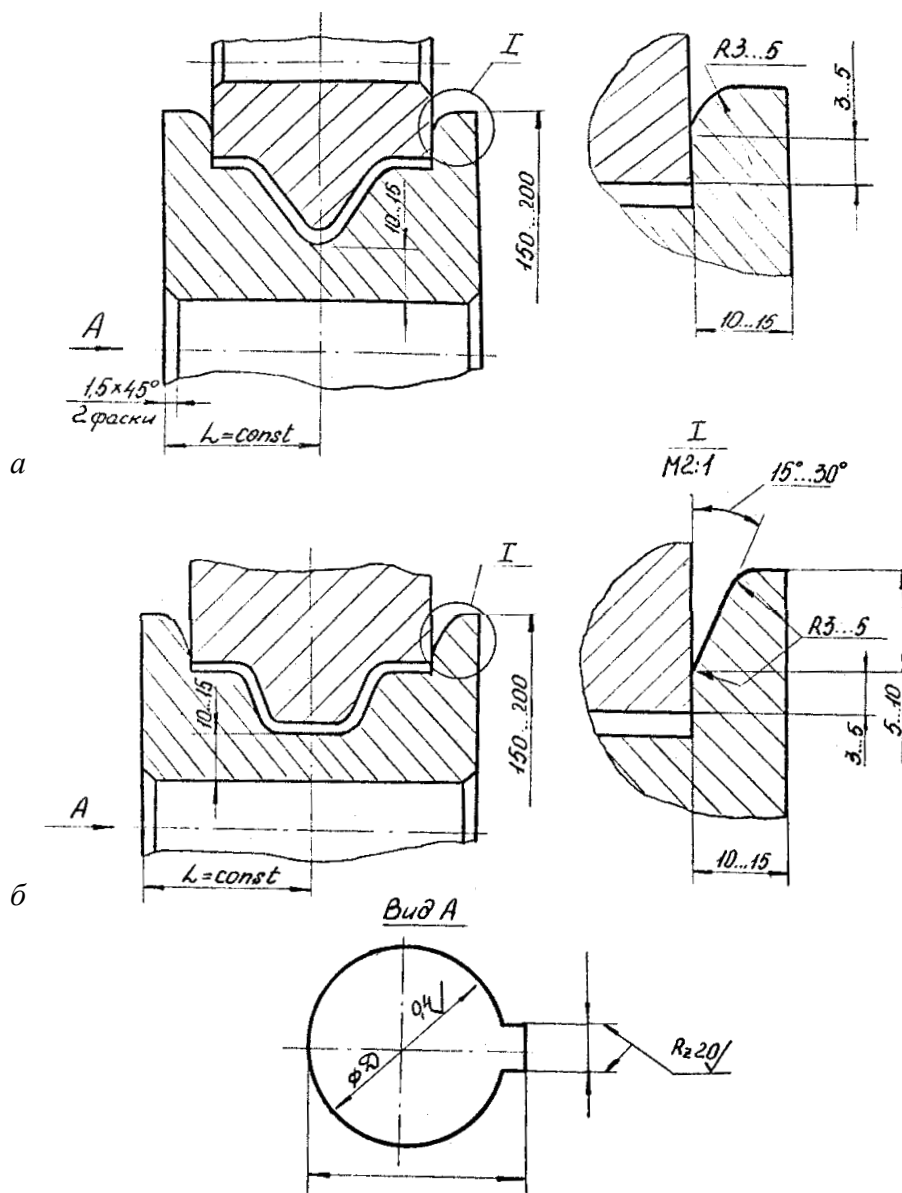


Рис. 4.13. Бурты и посадочные места ролика: а – скругление по радиусу; б – сочетание скругленного и наклонного прямолинейного участка

Более подробное описание элементов формующих роликов и условий замыкания роликовых калибров приведено в работе [4].

4.4. Изготовление формующих роликов [145, 146]

При изготовлении профилей особое внимание уделяют соответствию размеров калибра чертежу и качеству поверхности роликов. В большинстве случаев шероховатость поверхности доводится полировкой до $0,4$ мкм. В отдельных случаях при серийном производстве может использоваться нанесение на ролики специальных антифрикционных и износостойких покрытий (нитрид титана, хром и др.), позволяющих уменьшить коэффициент трения заготовки с роликом, повысить износостойкость инструмента и обеспечить ряд других преимуществ.

Изготовление основных формующих валов производится в такой последовательности [4, 146]:

1. Резка сортового проката или поковок на заготовки (механическая ножовка, пила Геллера);

2. Токарная обработка отрезанных заготовок в габаритный размер ролика, сверление отверстия под вал (универсальный токарный станок типа 16К20);

3. Черновая токарная обработка по рабочему контуру с припуском 0,5 мм на линейные размеры и 1 мм на диаметральные; труднодоступные места обрабатываются без припусков в чистовой размер (универсальный токарный станок типа 16К20);

4. Сверлильные, долбежные и другие слесарные операции;

5. Термическая обработка (58..62 HRC);

6. Шлифовка посадочного отверстия под вал и торцев ролика (внутришлифовальный станок);

7. Чистовая обработка наружного контура в центрах на токарных станках (универсальный токарный станок типа 16К20, индикаторная стойка, эльборовый режущий инструмент);

8. Полировка рабочего контура (полировочный станок, наждачная бумага различной зернистости, паста ГОИ, войлок).

При изготовлении инструмента размеры рабочего контура роликов всех переходов контролируются согласно чертежу.

Авторами работы создана программа расчета себестоимости изготовления формующих роликов, алгоритм реализации которой

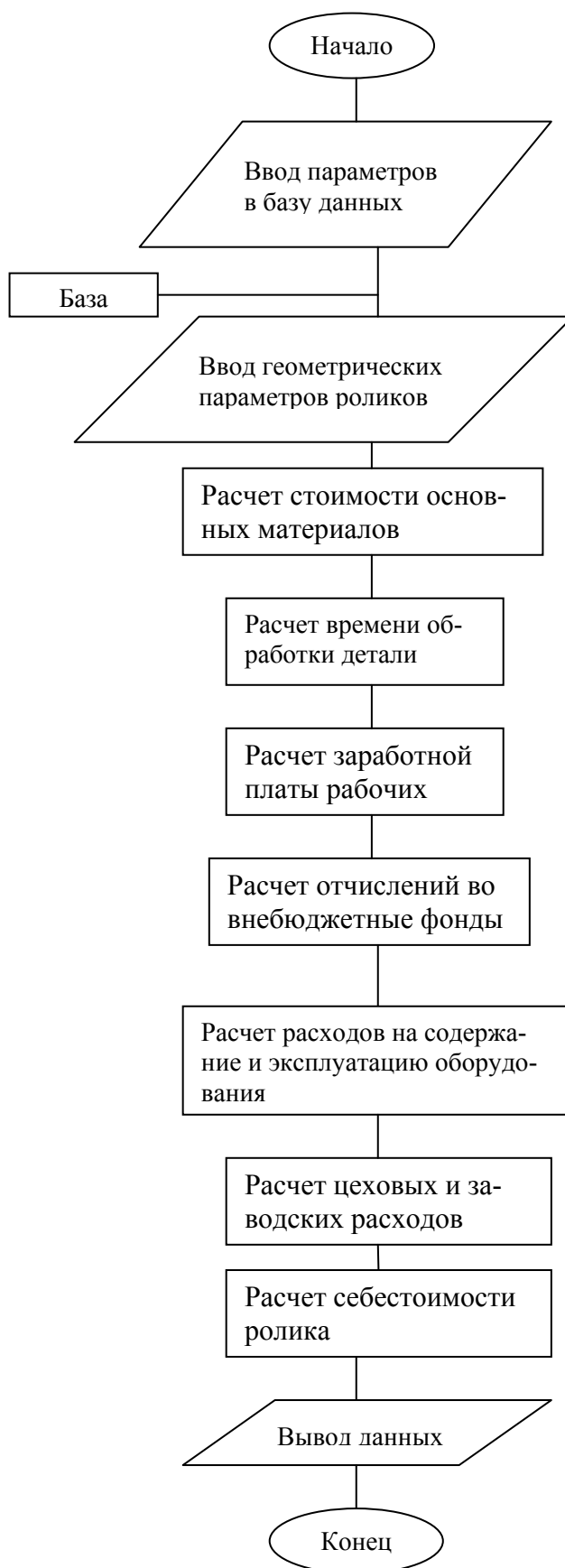


Рис. 4.14. Алгоритм программы расчета себестоимости изготовления роликов

приведен на рис. 4.14. Программа предназначена для работы в операционной системе Windows и реализована в интегрированной среде Delphi-5, что позволило организовать удобный интерфейс оператора в диалоговом режиме в соответствии с принятыми в настоящее время правилами создания интерфейса в прикладных системах на персональных компьютерах с использованием всплывающих окон, содержащих поля ввода с пояснениями, меню (выпадающих списков), чертежей и т. д.

Разработанная программа прошла отладку и тестирование на примере изготовления формующих роликов для производства швеллерного профиля (рис. 4.15). Интерфейс программы представлен на рис. 4.16.

Программа базируется на математической модели расчета себестоимости изготовления роликов, позволяющей определить стоимость материалов на партию деталей с учетом транспортно-заготовительных расходов, и время обработки поверхностей при операциях механической обработки.

При этом работа программы по определению скоростных параметров обработки осуществляется в режиме советника – компьютер предлагает свой вариант, который можно при желании скорректировать.

Важным моментом является выбор коэффициентов при расчете времени обрабатываемых операций. Здесь учитываются физико-механические свойства и состояние поверхности обрабатываемого материала, влияние материала инструмента и скорости обработки.

Затраты на текущий ремонт и амортизация оборудования принимаются в долях стоимости основных фондов.

В отдельных подпунктах выдаются значения фонда заработной платы основных производственных рабочих и затраты на вспомогательные материалы.

Следует также отметить, что разработанный алгоритм позволяет учесть изменения стоимости основных материалов и энергоносителей,

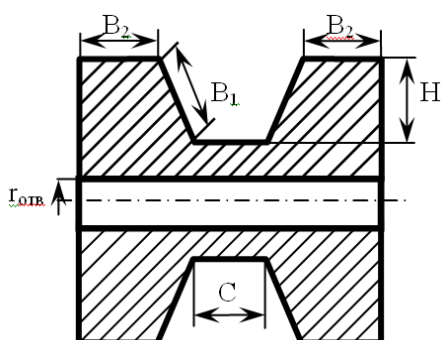


Рис. 4.15. Чертеж ролика для расчета себестоимости его изготовления

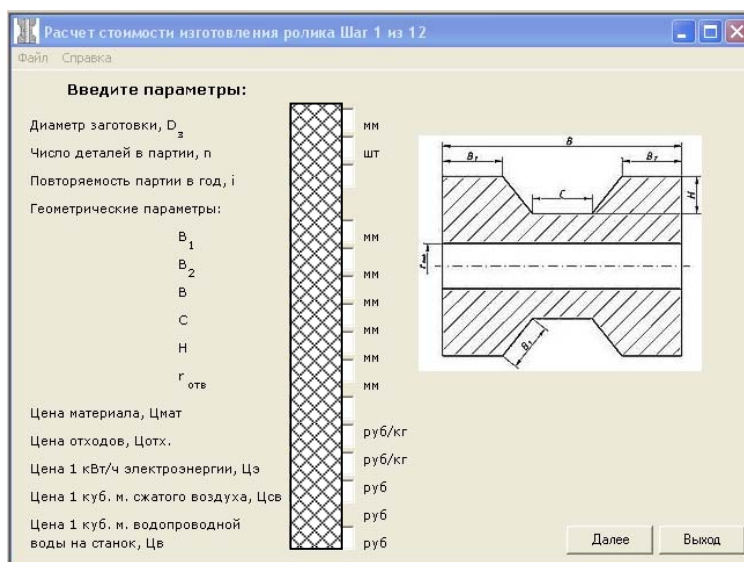


Рис. 4.16. Одно из окон интерфейса программы расчета себестоимости изготовления формующих роликов

а это особенно актуально в условиях современной экономики.

На рис. 4.17 представлена зависимость себестоимости ролика в условных единицах для иллюстрации соотношения трудозатрат и стоимости основного материала. Зависимость получена в результате работы одного из модулей программы.

Разработанная программа имеет ряд приложений на предприятиях-разработчиках интенсивной технологии профилирования г. Ульяновска: 1. Оптимизация затрат на изготовление технологического оснащения на стадии проектирования (вспомогательный инструмент технолога-разработчика); 2. Расчет затрат на этапе подготовки контрактов; 3. Оценка технологичности изготовления роликов и совершенствование процесса по технологическим цепочкам; 4. Упрощение работы цехового экономиста и бухгалтера.

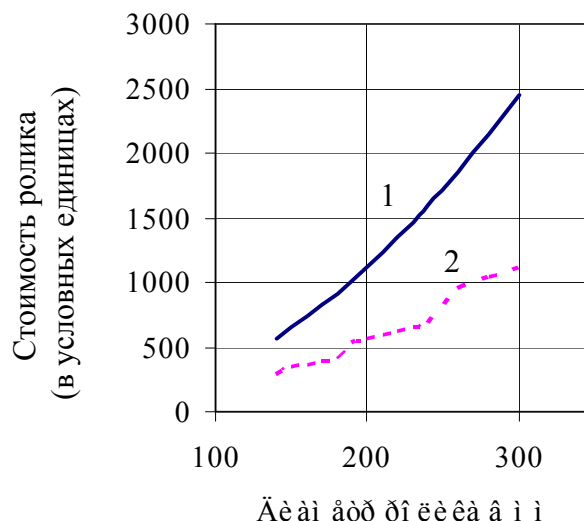


Рис. 4.17. Зависимость себестоимости ролика от его диаметра в разложении на: 1 – стоимость материала; 2 – трудозатраты

4.5. Отладка процесса формообразования

4.5.1. Выбор и настройка оборудования

Выбор профилировочного станка для изготовления профиля заданного типоразмера определяется размером сечения профиля, числом переходов и требуемой мощностью для формовки профиля [87].

В разд. 3 работы для проведения исследований и изготовления ряда профилей использовался шестиклетьевого станок ГПС-350М6 с длиной рабочих валов 350 мм. Основные характеристики станка даны в табл. 4.1, схема станка с обозначениями основных частей приведена на рис. 4.18.

Таблица 4.1

Основные характеристики станка ГПС-350М6

№	Параметр станка	Значение параметра
1	Высота поверхности станины над полом, мм	785
2	Расстояние от поверхности станины до нижнего рабочего вала, мм	155
3	Наибольшая глубина профилирования, мм	50
4	Число оборотов рабочих валов, об/мин	25
5	Скорость профилирования, м/мин	8,5
6	Толщина обрабатываемого материала, мм	0,6 – 2,5

№	Параметр станка	Значение параметра
7	Максимальная ширина заготовки, мм	350
8	Диаметр рабочих валов, мм	50
9	Длина рабочей части валов, мм	350
10	Регулировка верхнего вала клетки профилирующей по вертикали, мм	70
11	Регулировка нижнего вала клетки профилирующей по вертикали, мм	20
12	Межосевое расстояние между валами, мм	120 – 190

В зависимости от вида профилей (ширины, толщины развертки профиля, количества технологических переходов) могут использоваться станки того же модельного ряда, начиная от ГПС-200М4 до ГПС-500М12.

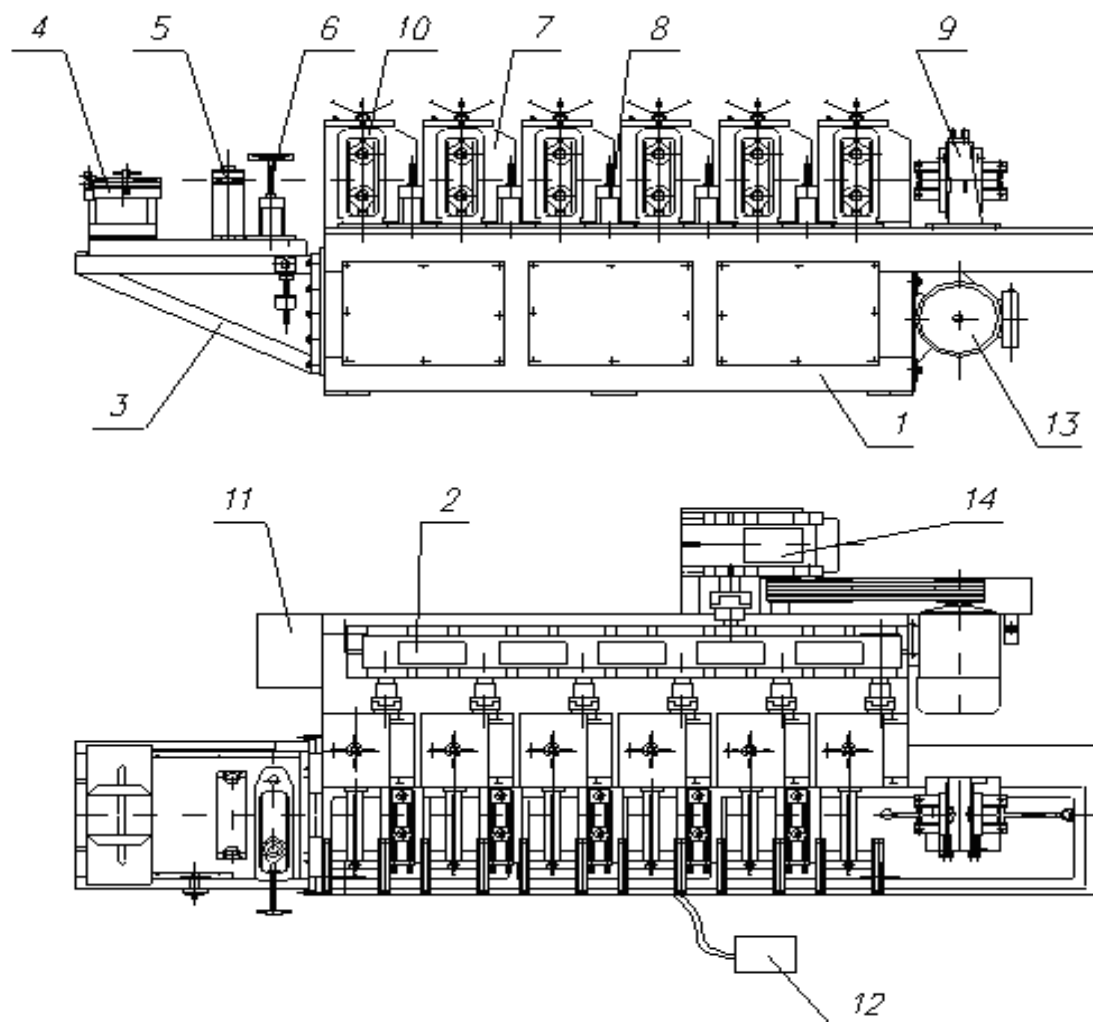


Рис. 4.18. Основные части станка ГПС-350М6:

1 – станина; 2 – коробка распределения; 3 – рама; 4 – устройство направляющее; 5 – устройство для протирки и смазки ленты; 6 – клеть предварительная; 7 – клеть профилирующая; 8 – клеть промежуточная; 9 – устройство правящее; 10 – серьга; 11 – основание коробки; 12 – пульт; 13 – электродвигатель; 14 – редуктор

Приемочные испытания вновь изготовленных станков и настройка станков в текущем производстве достаточно подробно описаны в работах [4, 87].

4.5.2. Применение дополнительных устройств

Дополнительные устройства и приспособления применяют для предотвращения таких дефектов, как кромковая волнистость, отклонение геометрии профиля; одновременно они осуществляют подгибку элементов профиля, что позволяет уменьшить количество основных переходов (клетей).

Вспомогательное технологическое оснащение (табл. 4.2) для производства гнутых профилей достаточно разнообразно.

Таблица 4.2

Вспомогательное оснащение для производства гнутых профилей

№	Наименование	Назначение
1.	Направляющие и подающие устройства	Задание заготовки в первую клеть профилегибочного станка
2.	Устройства формирования продольной кривизны	Придание профилю продольной кривизны
3.	Проводящие устройства	Задание заготовки в клетки станка, предотвращение дефектов формы профиля
4.	Правильные устройства	Правка профиля при формообразовании или правка после него растяжением

Вспомогательное оборудование (правильное, раскройное, отрезное, а также рулонницы, штабеллеры и пр.) для профилирования подробно описано в работах [4, 87].

4.5.3. Доработка калибров

Доработка калибров ведется в случае возникновения дефектов профиля при отработке технологии. Приведем здесь только те виды доработок, с которыми приходилось сталкиваться авторам в процессе выполнения работы.

К доработкам калибра можно отнести введение дополнительных углов, освобождение прилегающих зон [124] (рис. 4.19).

Введение дополнительных углов (рис. 4.19) применяют для увеличения плавности захода заготовки, устранения

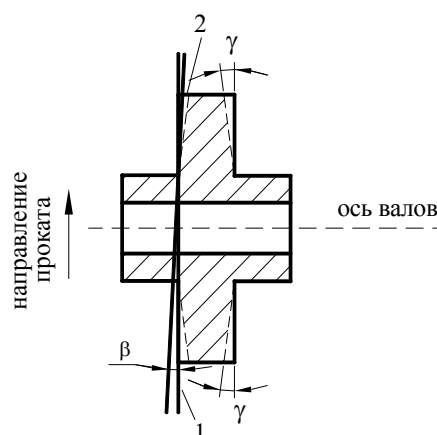


Рис. 4.19. Введение дополнительных углов γ при формовке полок с углами подгибки более 90°

зон излишнего проскальзывания и снижения величины максимальных контактных давлений на профиль. Доработка универсальна и применяется как при небольших углах захода торца профиля (точка 1), так и при сравнительно больших углах β , для устранения контакта торца после выхода из калибра с крайней точкой ролика (точка 2). В другом случае, когда часть профиля уже отформована в предыдущих переходах, для предотвращения излишнего контакта вводят дополнительные углы (рис. 4.20, а) или дополнительные проточки (рис. 4.20, б).

Существует и ряд других приемов для корректировки технологического оснащения, изложенных в работах [4, 87, 124]. Однако задача разработчика технологии состоит в том, чтобы свести к минимуму корректировки и итерационные процедуры пробных прокаток (повышение издержек на 11 – 13%).

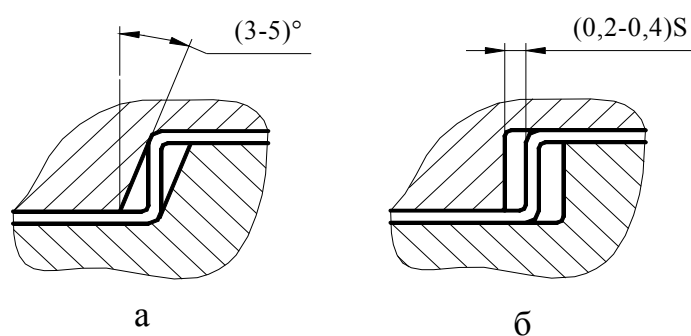


Рис. 4.20. Освобождение отформованных зон:
а – введение дополнительных углов; б – дополнительная проточка

Это достижимо только при наличии научно обоснованной методики разработки технологии производства гнутых профилей с отбортовками.

4.6. Алгоритм разработки технологии изготовления профилей с элементами жесткости – отбортовками

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенные в предшествующих разделах работы, обобщены и реализованы в методике разработки технологии изготовления профилей с отбортовками, представленной в виде алгоритма (рис. 4.21). Укрупненный алгоритм разработки технологии изготовления МИД профилей с элементами жесткости – отбортовками, учитывающий технические и экономические факторы, охватывает все этапы от проектирования и отладки технологии, включая стадию получения готового профиля и разработки технической документации.

Алгоритм состоит из укрупненных блоков (этапов). На первом этапе осуществляется ввод параметров в базу данных или использование уже имеющихся данных.

На втором этапе осуществляют проработку профилей на общую технологичность, используя рекомендации источников [142, 124], и на технологичность изготовления профилей из материала с покрытием. Если

профиль не технологичен, то изменяют (оптимизируют) его конструкцию по согласованию с заказчиком технологии или же предусматривают применение дополнительного технологического оснащения.

На третьем этапе осуществляют расчет или выбор технологических параметров процесса (расположение профиля в роликах, выбор базового элемента и оси профилирования, расчет ширины заготовки, выбор количества переходов, углов подгибки), исходя из моделей разд. 2 работы, результатов экспериментальных исследований разд. 3 и рекомендаций разд. 4 работы.

На четвертом этапе осуществляют теоретический расчет утонения заготовки и сравнивают его с допустимым значением для соответствующей угловой зоны. В случае превышения нормированных значений увеличивают число переходов или принимают иные меры.

На пятом этапе определяют протяженность ЗПП для каждого технологического перехода и проверяют углы подгибки. Если протяженность ЗПП меньше межклетьевого расстояния, переходят к окончательному выбору оборудования, иначе – рассматривают возможность применения межклетьевых проводок. Если же применение межклетьевых проводок не может привести к положительному результату, то процедура проектирования заканчивается, и рекомендуется применить другой метод формообразования профиля.

При возможности предотвращения утонения с помощью межклетьевых проводок осуществляется переход к уточнению выбора профилировочного станка.

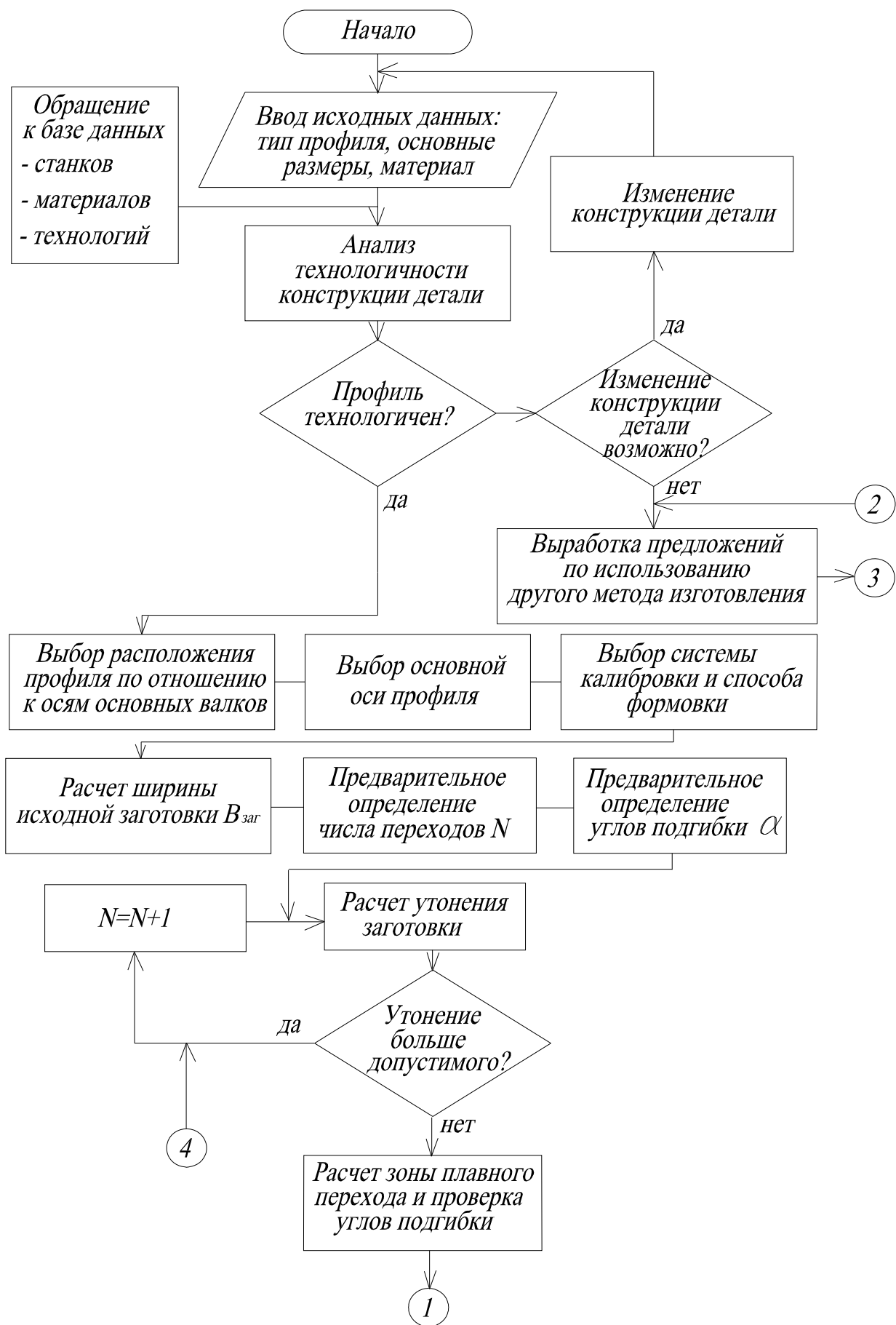
На шестом этапе определяют посадочные размеры технологического оснащения и сопоставляют их с параметрами профилировочного станка. При наличии соответствия объявляются параметры профилировочного оборудования и осуществляется переход к расчету рабочих калибров формующих роликов.

На седьмом этапе решается вопрос устранения пружинения, после чего начинается проектирование технологического оснащения с его изготовлением и пробное изготовление профиля.

На восьмом этапе осуществляется доработка технологического оснащения и окончательно определяются режимы процесса формообразования.

На последнем этапе производится корректировка имеющейся и разработка другой необходимой для заказчика технической и технологической документации. На этом процесс разработки технологии завершается.

Внедрение методики разработки технологии производства МИД профилей с отбортовками, представленной укрупненным алгоритмом рис. 4.21, на предприятиях-разработчиках г. Ульяновска позволило сократить затраты освоения одного типоразмера профиля в среднем на 8,3 %.



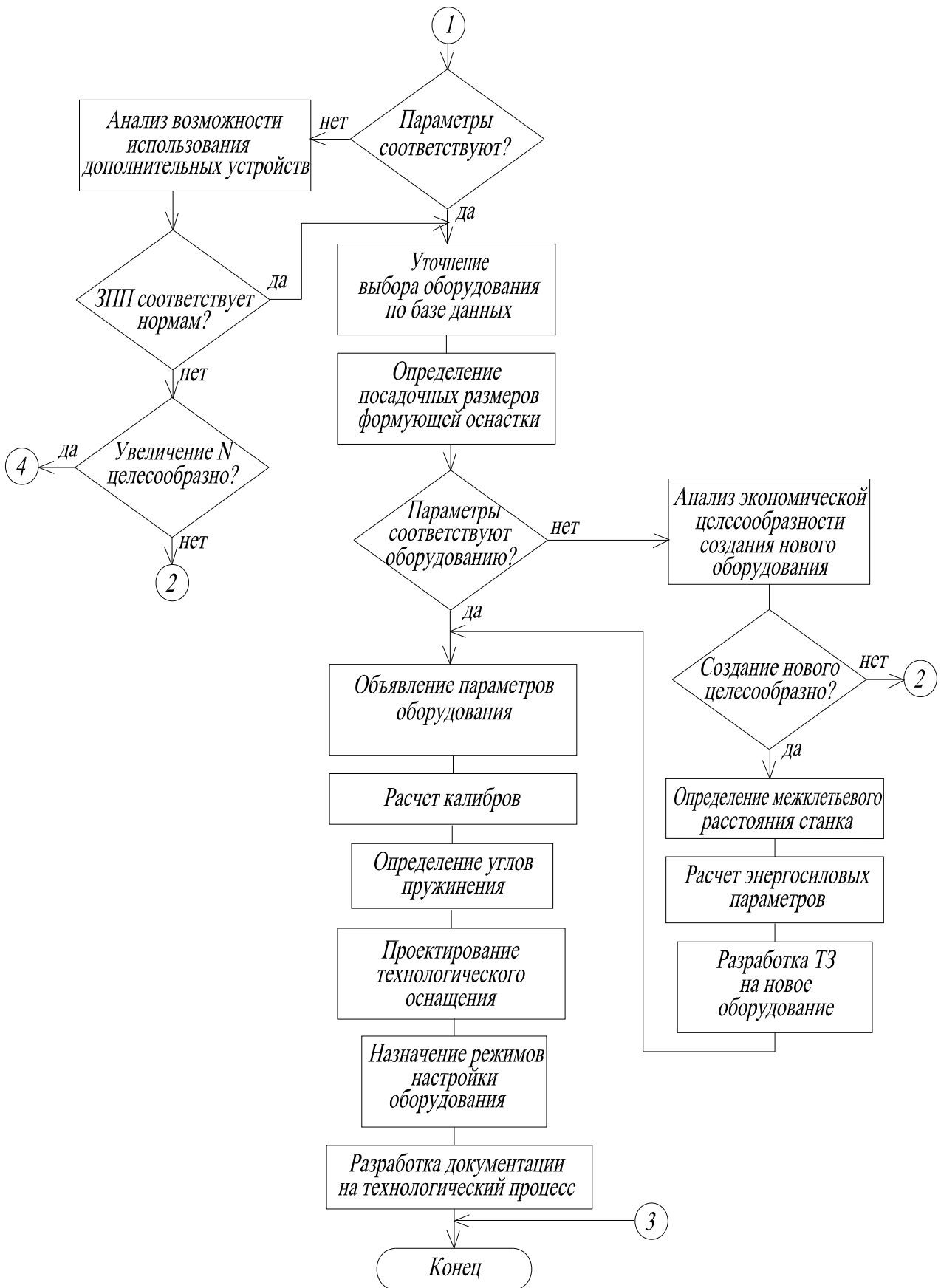


Рис. 4.21. Алгоритм разработки технологии изготовления профилей с отбортовками

4.7. Параметры профилей для ответственных конструкций [147, 148]

Профили, предназначенные для эксплуатации в составе машиностроительных и строительных конструкций, обычно соответствуют по геометрии их сечения требованиям чертежа. Дополнительные требования к ним, как правило, не предъявляются. Более жесткие требования по размерным параметрам предъявляются к профилям для автомобилестроения.

На основе предложенной методики в ОАО «Ульяновский НИИТ» разработаны технологии производства профилей из алюминиевых сплавов для Воронежского авиастроительного объединения (изделие АН-140) (рис. 4.22).

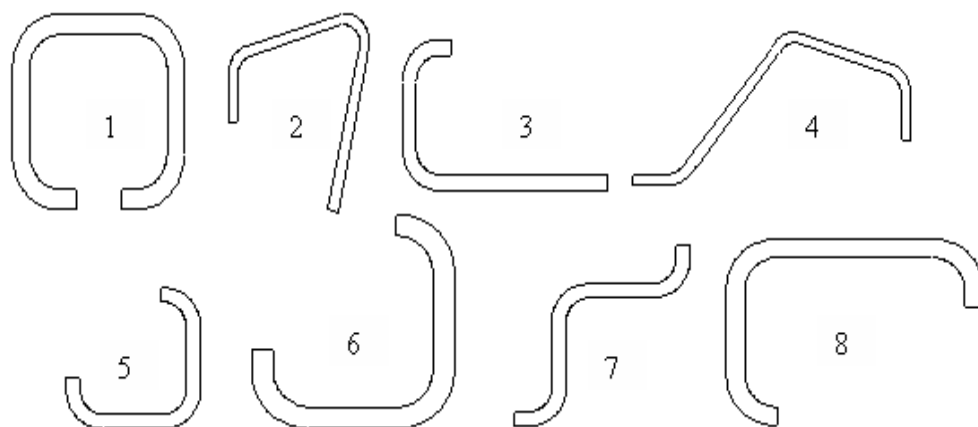


Рис. 4.22. Гнутые профили с отбортовками для ВАСО: 1- 11×11×1,5 мм (12Х18Н10Т-М); 2 – 21,5×16×12,5×1,0 мм (Д16Мл1); 3 – 15×20×5×1,2 мм (АМГ 6М); 4 – 24×19×14×18×2,0 мм (Д16Мл1); 5 – 15×15×12 мм (АМГ 6М); 6 – 20×20×1,2 мм (АМГ 6М); 7 – 15×15×1,2 мм (АМГ 6М); 8 – 15×10×1,2 мм (АМГ 6М)

При освоении указанной номенклатуры затраты на отработку технологии были сокращены в среднем на 9,2% по отношению к ранее применявшейся методике разработки технологии, хотя требования к авиационным профилям по ряду позиций достаточно высоки. Некоторые требования к гнутым авиационным профилям приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Требования к гнутым профилям в авиастроении

Контролируемый параметр	Требование	Примечание
Прогиб	Не более 1 мм/м	Под грузом 50 Н
Скрутка	Не более 1 град./мм	–
Неровности поверхности в зоне изгиба	Не более 30 мкм	По высоте
Отклонения размеров сечения	Не более 0,2 мм	Кроме толщины
Покрытие	Допускаются вмятины, риски глубиной до 30 мкм	РТМ 1.4.1630–86
Допуск на толщину	В пределах допуска исходного листа	Утонение материала в угловой зоне не допускается
Остаточная деформация	Не более 20 %	–
Механические свойства	По ОСТ 190125–83	РТМ 1.4.2005 – 92

Кроме того, авиационные профили должны удовлетворять определенным требованиям по критическим напряжениям сжатия, циклической усталости, коррозионной стойкости; они должны выдержать соответствующие испытания по указанным показателям. Опытные партии профилей, указанных на рис. 4.22, изготовлены и переданы заказчику для испытаний. На рис. 4.23 представлены профили с отбортовками для авиастроения, которые были изготовлены в предшествующие годы в ОАО «Ульяновский НИАТ» не МИД, а стесненным изгибом.

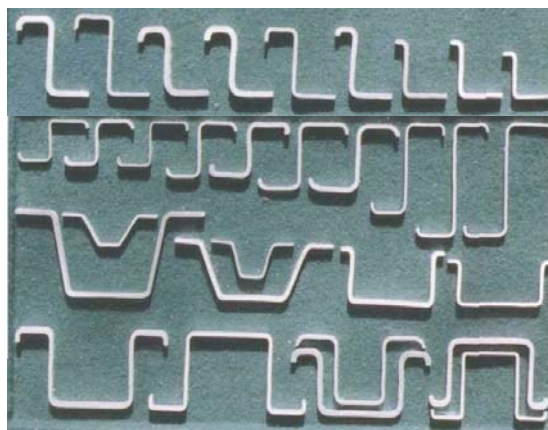


Рис. 4.23. Профили из алюминиевых сплавов, изготовленные методом СИ, и применяемые в авиастроении

4.8. Внедрение методики, технологии и экономический эффект

Методика разработки технологии и процессы формообразования профилей с отбортовками (10 типоразмеров профилей, приведенных в табл. 3.1), а также патент на роликовую оснастку внедрены в ОАО «Ульяновский НИАТ» в 2006 – 2010 гг. На рис. 4.24 показаны несколько внедренных с участием авторов профилей с отбортовками.

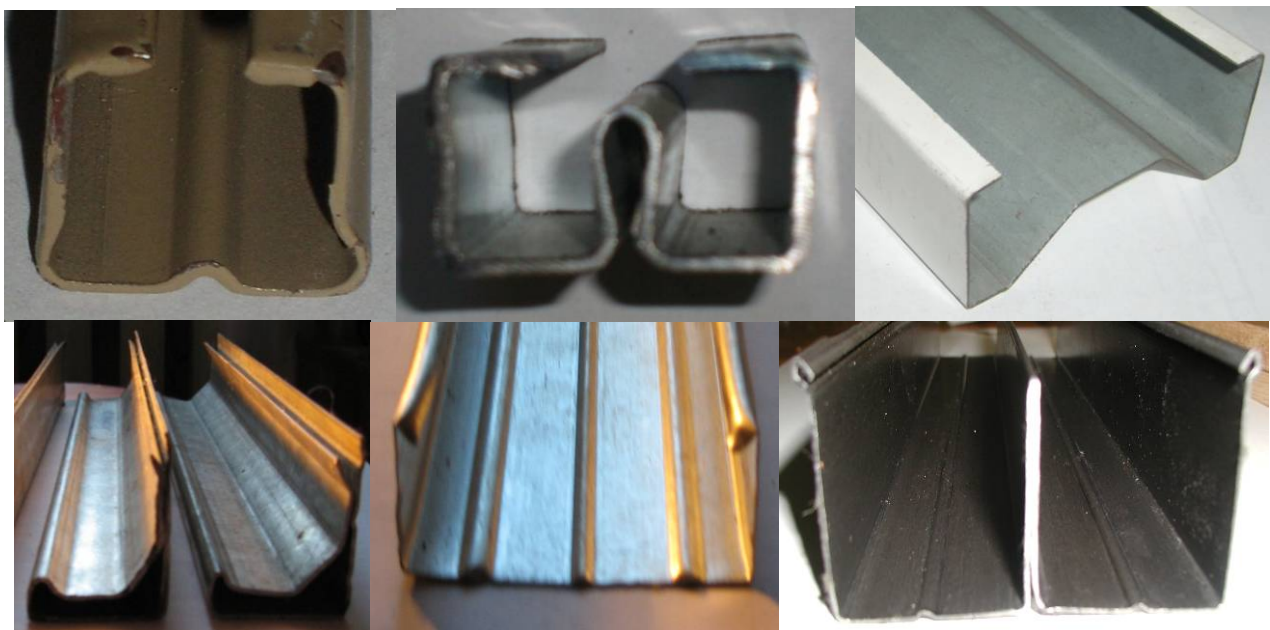


Рис. 4.24. Изготовленные МИД профили с отбортовками для строительства и энергетики

В табл. 4.4 приведена итоговая таблица расчета экономического эффекта (полный расчет здесь не приводится) от использования результатов работы (новая методика разработки технологии). В качестве базового варианта была принята ранее использовавшаяся методика разработки технологии изготовления

профилей с отбортовками. Расчет экономического эффекта выполнен для подтверждения преимущества предлагаемой методики по экономической составляющей.

Таблица 4.4

Расчет экономического эффекта

№	Выполняемые работы	Затраты, тыс. руб.	
		базовый вариант	предлагаемая методика
1	Разработка и оформление конструкторской и технологической документации	10,2	10,9*
2	Изготовление роликовой оснастки (включая стоимость материалов) и настройка оборудования	172,2	172,2
3	Запуск пробной партии	1,47	1,47
4	Доработка калибров	9,54	-
	Отладка технологии после доработки калибров (итерационная)	7,68	-
	Итого	201,09	184,57

* - повышение трудоемкости за счет выполнения расчетных процедур по разработанным моделям

Разность затрат по базовому варианту и по предлагаемой технологии составляет **16,52 тыс. руб.** на освоение одного типоразмера профиля. Учитывая, что разработчиками технологий интенсивного формообразования ежегодно осваивается более 300 типоразмеров профилей, из которых профили с отбортовками составляют порядка 11%, то расчетный годовой экономический эффект Э от использования результатов работы составил:

$$\mathcal{E} = (C_{б.в.} - C_{п.т.}) \cdot N \cdot n = (201,09 - 184,57) \cdot 300 \cdot 0,11 = 545,16 \text{ тыс. руб.},$$

где $C_{б.в.}$ – себестоимость освоения одного типоразмера профиля по базовой технологии; $C_{п.т.}$ – себестоимость освоения одного типоразмера профиля по предлагаемой технологии; N – годовой объем освоения типоразмеров профилей предприятиями – разработчиками г. Ульяновска; n – процент типоразмеров профилей с отбортовками по отношению к общему объему осваиваемых гнутых профилей предприятиями – разработчиками г. Ульяновска.

4.9. Выводы

Анализ технологичности профиля позволяет определить не только возможность изготовления профиля МИД, но оптимизировать затраты на освоение и производство профиля.

Установлено, что схемы и режимы формообразования (включающие расположение профиля в валках, выбор оси профилирования, углы подгибки и др.), рассчитанные по предложенным авторами моделям, дают возможность повышения качества за счет уменьшения утонения, сохранности покрытия и уменьшения дефектности.

Предложенные авторами технические решения по расчету калибров и назначению скругления буртов замыкающих элементов роликов повышают качество профиля и снижают уровень затрат на устранение возникающих дефектов.

Разработанная авторами программа расчета себестоимости формующей оснастки в среде Delphi сокращает трудозатраты разработчиков, цеховых работников и позволяет оптимизировать производственные издержки.

Установлено, что отработка технологии сопровождается итерационными корректировками технологического оснащения с повышением производственных издержек до 11 – 13%.

Предложенная методика в виде алгоритма разработки технологии изготовления профиля с отбортовками позволяет предотвращать дефекты переформовки заготовки, ее недопустимого утонения, нарушения покрытия и сократить затраты на освоение одного типоразмера профиля на 8 – 9 %.

Методика разработки технологии (алгоритм) и процессы формообразования профилей с отбортовками (более 10 типоразмеров профилей), а также патент на роликовую оснастку внедрены в ОАО «Ульяновский НИАТ» и на четырех других предприятиях РФ. Расчетный годовой экономический эффект составляет более 545 тыс. руб. (на момент опубликования работы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ применения профилей с отбортовками показал, что эффективность их применения на 20% выше по сравнению с применением фасонных профилей. Из известных методов изготовления профилей с отбортовками в условиях мелкосерийного производства предпочтительным является метод интенсивного деформирования. Анализ работ по теме позволил выявить проблемы, определить материалы, оборудование и типоразмеры профилей для исследования, сформулировать задачи работы.

2. Разработанные классификаторы профилей с отбортовками и их дефектов позволили систематично исследовать и совершенствовать технологию с обеспечением высокого качества профилей и снижением издержек на их освоение.

3. Модель изменения толщины заготовки на различных переходах и экспериментальные исследования несимметричных профилей с отбортовками показали, что при растяжении имеет место утонение порядка 5%, а при поджатии – утолщение до 4%. Теоретические значения отличаются от экспериментальных не более чем на 6%.

4. Построенная на основе ПФЭ регрессионная модель устанавливает зависимость изменения толщины заготовки от размеров отбортовки, толщины профиля и подгибки несущей полки. Расхождение значений изменения толщины заготовки в угловых зонах, полученных по теоретической модели и по регрессионной модели не превышает 14%.

5. Полученное вариационным методом решение задачи о протяженности ЗПП позволяет повысить качество профилей за счет предотвращения переформовки заготовки и оптимизации углов подгибки, позволяющих избежать дефектов неустойчивости пластического деформирования. Расхождение теоретических и экспериментальных данных по исследуемому массиву профилей с отбортовками семи типоразмеров в среднем лежит в пределах 12 – 17 %.

6. Моделирование торцевого поджатия в среде Ansys позволило определить зависимости относительного радиуса, утонения и пружинения от величины подсадки, выявить допустимые значения поджатия полки. Разгрузка наружного контура зоны изгиба при поджатии полки дает возможность получать радиусы изгиба меньше допустимых радиусов при гибке моментом.

7. Исследованием влияния промежуточных радиусов кривизны заготовки на утонение заготовки и контактные напряжения, влияющие на сохранность покрытия, установлено, что применение плавно изменяющихся радиусов изгиба заготовки по переходам в 1,5 – 2 раза снижает значения утонений заготовки и уровень контактных напряжений.

8. Новый алгоритм (методика) разработки технологии производства профилей с отбортовками, учитывающий расположение профиля в валках, выбор базового элемента и оси профилирования, формы замыкающих элементов ро-

ликов, позволяет оптимизировать схему формообразования, сократить число переходов, повысить качество профилей и сократить на 8 – 9 % издержки на освоение технологии их производства. Разработанная авторами программа расчета себестоимости формующей оснастки в среде Delphi сокращает трудозатраты разработчиков, цеховых работников и позволяет оптимизировать производственные издержки.

9. Разработанные патент на роликовую оснастку, более 10 технологий производства профилей с отбортовками и методика разработки технологии изготовления профилей с отбортовками внедрены с участием авторов на пяти предприятиях РФ, что подтверждается актами технического внедрения. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 545,16 тыс. руб. (на момент опубликования работы).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патентный отдел. [электронный ресурс]: Омск, Россия, [2000] – URL: <http://www.sibpatent.ru> (дата обращения 20.04.2011)
2. ГОСТ 14350–80. Профили проката гнутые. Термины и определения. – М. : Издательство стандартов, 1980.
3. ОАО «Киевметаллопром». [электронный ресурс]: Киев, Украина, [2006] – URL: <http://www.metalprokat.com> (дата обращения 20.04.2011)
4. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 444 с.
5. Марковцев, В.А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 244 с.
6. Куприн, П. Н. Снижение массы и повышение ресурса ЛА при внедрении гнутых профилей и перспективных материалов / П. Н. Куприн, И. М. Колганов, А. Н. Антонов // Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции. – М. : МАТИ, 1999. – С. 838 – 839.
7. Братухина, А. Г. Современные технологии авиастроения / А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. – М. : Машиностроение, 1999. – 832 с.
8. Филимонов, В. И. Изготовление методом интенсивного деформирования профилей из листа и их внедрение в авиастроении / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, И. М. Колганов, С. В. Филимонов, М. В. Илюшкин // Авиационная промышленность. – 2001. – № 4. – С. 21 – 23.
9. Колганов, И. М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования / И. М. Колганов. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – 108 с.
10. Башилов, А. С. Комбинированные элементы жесткости и совершенствование конструкции летательных аппаратов / А. С. Башилов, В. И. Ершов, И. М. Колганов // Перспективные методы и средства обеспечения качества летательных аппаратов : сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – С. 11 – 15.
11. Куприн, П. Н. Решение одной задачи повышения качества гнутых профилей / П. Н. Куприн, И. М. Колганов, Е. В. Мансуров // Прогрессивные технологии, материалы и конструкции : сборник научных трудов. – Ульяновск, 1999. – С. 89 – 93.
12. Гиммельфарб, А. Л. Основы конструирования в самолетостроении / А. Л. Гиммельфарб. – М. : Машиностроение, 1980. – 367 с.
13. Карлашов, А.В. Исследование коррозионной стойкости элементов внутреннего силового набора / А.В. Карлашов, А.М. Свилицкий, П.В. Токарев // Авиационная промышленность. – М. : 1986. – № 11. – С. 69 – 71.
14. ОАО «Ульяновский НИАТ». [электронный ресурс]: Ульяновск, Россия, [2000] – URL: <http://www.ulniat.ru> (дата обращения 20.04.2011)
15. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.

16. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. – М. : Машиностроение, 1979. – 567 с.
17. Березовский, С. Ф. Производство гнутых профилей / С. Ф. Березовский, Ф. М. Кропылев. – М. : Metallurgia, 1978. – 152 с.
18. Протопопов, В. Л. Технологические процессы и оборудование для производства гнутых профилей / В. Л. Протопопов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – № 6. – С. 6 – 9.
19. ТУ 1122-181-024946880-99. Профили стальные гнутые тонкостенные для строительства.
20. ТУ 1120-100-47515705-00. Профили С-образные стальные холодногнутые для строительства.
21. ТУ 1122-075-02494680-2001. Профили стальные холодногнутые для строительства.
22. «[25mm.ru - кровельное оборудование](http://www.25mm.ru)». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2006] – URL: <http://www.25mm.ru> (дата обращения 20.04.2011)
23. Группа компаний «А и М - холдинг». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2000] – URL: <http://www.amp.ru> (дата обращения 20.04.2011)
24. Журнал «ТехСовет». [электронный ресурс]: Екатеринбург, Россия, [2003] – URL: <http://www.tehsovet.ru> (дата обращения 20.04.2011)
25. ООО «СПЕЦТЕХНОЛОГИЯ». [электронный ресурс]: Ульяновск, Россия, [2002] – URL: <http://www.st.mv.ru> (дата обращения 20.04.2011)
26. Производство труб. Справочник. [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2001] – URL: <http://www.mau.dp.ua/index.php?name=Pages&op=page&pid=67> (дата обращения 20.04.2011)
27. ЗАО «РОСИНДУСТРИЯ-ХОЛДИНГ». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2000] – URL: <http://www.rosprom.net> (дата обращения 20.04.2011)
28. ЗАО «ФЕСТАЛЬПИНЕ АРКАДА ПРОФИЛЬ». [электронный ресурс]: Смоленск, Россия, [2000] – URL: <http://www.arkada.ru> (дата обращения 20.04.2011)
29. Компания «БалтПрофиль». [электронный ресурс]: Санкт-Петербург, Россия, [2006] – URL: <http://www.baltprofile.ru> (дата обращения 20.04.2011)
30. Компания «Гранит». [электронный ресурс]: Самара, Россия, [2006] – URL: <http://granit-samara.ru> (дата обращения 20.04.2011)
31. Компания «Индустрия успеха». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2001] – URL: <http://www.in-vent.ru> (дата обращения 20.04.2011)
32. Компания «ЛАСАР». [электронный ресурс]: Липецк, Россия, [2006] – URL: <http://www.strprofil.ru> (дата обращения 20.04.2011)
33. Компания «Металлоторг». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2001] – URL: <http://www.metaltrade.ru> (дата обращения 20.04.2011)
34. Гнутые профили проката: справочник / И. С. Тришевский, Н. М. Воронцов, Ю. В. Дзина и др. – М.: Metallurgia, 1967. – 379 с.
35. Издательства «НПО "Профессионал"». [электронный ресурс]: Санкт-Петербург, Россия, [2001] – URL: <http://www.naukaspb.ru> (дата обращения 20.04.2011)

[20.04.2011](#))

36. ОАО «НИИТавтопром». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2006] – URL: <http://www.niitavtoprom.ru> (дата обращения 20.04.2011)
37. ООО «Волгаметалл». [электронный ресурс]: Самара, Россия, [2004] – URL: <http://www.volgametal.ru> (дата обращения 20.04.2011)
38. ТПО «Симплекс». [электронный ресурс]: Челябинск, Россия, [2006] – URL: <http://www.simplex74.ru> (дата обращения 20.04.2011)
39. Филимонов, С. В. Исследование технологических возможностей гибочно-прокатного станка ГПС–300 / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов // Внутривузовская научно-техническая конференция.: Тезисы докладов. – Ульяновск : УлГТУ, 1999. – С. 37–38.
40. Производство и применение гнутых профилей проката: справочник / под ред. И. С. Тришевского. – М. : Metallurgia, 1975. – 576 с.
41. Проскуряков, А. Г. Исследование возможности формообразования профилей из алора–41 в кромкогибочных машинах / А. Г. Проскуряков // Авиационная промышленность. – 1989. – № 6. – С. 10 – 11.
42. Компания «ТВМк» [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2001] – URL: <http://www.tbmk.ru> (дата обращения 20.04.2011)
43. Компания «CVH». [электронный ресурс]: Санкт-Петербург, Россия, [2003] – URL: <http://www.skladskoe.spb.ru> (дата обращения 20.04.2011)
44. Компания «ZEALART». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2000] – URL: <http://www.yondi.ru> (дата обращения 20.04.2011)
45. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
46. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
47. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.
48. Ершов, В. И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
49. ОАО «АМУРМЕТАЛЛ». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2007] – URL: <http://www.amurmetal.ru> (дата обращения 20.04.2011)
50. Колганов, И. М. Факторы, гарантирующие качество гнутых тонкостенных профилей проката / И. М. Колганов, П. Н. Куприн, Е. В. Мансуров // Новые технологии в авиастроении : сборник научных трудов. – Ульяновск, 2002. – С. 81 – 84.
51. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / под общей ред. Л. И. Рудмана. – М. : Машиностроение, 1988. – 496 с
52. Справочник технолога-машиностроителя: в 2. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – 656 с.
53. Справочник технолога-машиностроителя: в 2. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

54. Колганов, И. М. Возможности формообразования листовых профилей стесненным изгибом при волочении через роликую фильеру / И. М. Колганов // *Авиационная промышленность*. – 1984. – № 9. – С. 36 – 38
55. Колганов, И. М. Изготовление гнутых листовых профилей повышенной жесткости из труднодеформируемых материалов / И. М. Колганов, Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков и др. // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1987. – № 3. – С.18 – 21.
56. 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.
57. Колганов, И. М. Разработка технологии и оборудования для формообразования профилей стесненным изгибом из сплава АБМ–1 / И. М. Колганов, Б. В. Богданов, А. С. Леукин // *Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли*. – М. : НИАТ, 1992. – С. 69 – 80.
58. Проскуряков, Г. В. Классификация схем формообразования профилей стесненным изгибом при гибке прокаткой / Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин, Э. М. Каримов // *Авиационная промышленность*. – 1990. – № 6. – С. 9 – 11.
59. Колганов, И. М. Расширение технологических возможностей формообразования профилей из листовых заготовок / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, Б. В. Богданов и др. // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1987. – № 8. – С.18 – 20.
60. Компания «Роллинг-Плюс». [электронный ресурс]: Ульяновск, Россия, [2006] – URL: <http://www.rolling-plus.ru> (дата обращения 20.04.2011)
61. Богоявленский, К. Н. Разработка методики расчета основных параметров процесса изготовления гнутых профилей / К. Н. Богоявленский, И. П. Манжурич, В. В. Рис, под ред. К. Н. Богоявленского // *Изготовление деталей пластическим деформированием*. – Л. : Машиностроение, 1975. – С. 383 – 396.
62. Докторов, М. Е. Новая технология производства С-образных профилей для теплиц / М. Е. Докторов, Г. В. Олейник, В. П. Гарбузов, Е. В. Хорхордин // *Разработка и исследование технологии производства гнутых профилей проката: отрасл. сб. науч. тр.* – Харьков : УкрНИИмет, 1984. – С. 79 – 87.
63. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / под ред. И.С. Тришевского. – Киев : Техника, 1980. – 535 с.
64. Скоков, Ф. И. Разработка и освоение технологии производства уголкового профиля с отбортовками / Ф. И. Скоков, С. В. Колоколов, М. Е. Докторов, В. В. Клепанда // *Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката* – Харьков: УкрНИИмет, 1970. – № 15. – С. 277 – 283.

65. А. с. 1484403 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления тонкостенных гнутых профилей / А. А. Посадских, Г. Г. Солоденко. – Оpubл. 07.06.89, Бюл. № 21.
66. А. с. 1703217 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых неравнополочных швеллеров / Р. И. Кирилов, В. Г. Антипанов, В. В. Пахарев, В. И. Гридневский. – Оpubл. 17.01.92, Бюл. № 1.
67. А. с. 942306 СССР. Способ изготовления неравнополочных гнутых профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 07.10.83, Бюл. № 37
68. А. с. 1757162 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления тонкостенных корытообразных профилей из листовых заготовок и устройство для его реализации / И. М. Колганов, А. С. Башилов, В.И. Филимонов и др. – Оpubл. 16.06.90. ДСП.
69. А. с. 1637901 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства корытного профиля / В. И. Гридневский, А. А. Ушаков, В. Г. Антипанов, Н. Т. Пахомов. – Оpubл. 30.03.91, Бюл. № 12.
70. А. с. 1731348 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления профилей с отбортовками / Г. Р. Хейфец, В. Б. Калужский, Б. Н. Сидоренко, Г. И. Безкоровайный. – Оpubл. 07.05.92, Бюл. № 17.
71. 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.
72. 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.
73. 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.
74. А. с. 1519812 СССР, МПК⁶ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых зетовых профилей проката / М. Е. Докторов, С. В. Мирошниченко, С. А. Батурин, С. А. Чиж. – Оpubл. 07.11.1989, Бюл. № 41.
75. 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.
76. А. с. 1148667 СССР, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых зетобразных профилей / А. И. Гулько, В. Ф. Светличный, А. К. Антонюк и др. – Оpubл. 07.04.1985, Бюл. № 12.
77. 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.
78. А. с. 1480919 СССР, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления полузамкнутых Z-образных профилей / В. Н. Николаев, А. И. Гулько, В. Ф. Свет-

- личный и др. – Оpubл. 23.05.1989, Бюл. № 19.
79. А. с. 1248690 СССР, МКИ В 21 D5/06. Способ изготовления листовых профилей с отбортовками / И. М. Колганов, Г. В. Проскураков, В. И. Колганов, В. И. Филимонов. – Оpubл. 27.09.86. Бюл. № 29.
 80. Патент 1431158 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей проката типа швеллеров с гофрами жесткости / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, В. Н. Кочубеев и др. – Оpubл. 15.12.94, Бюл. № 23.
 81. Патент 2037352 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутого корытного профиля / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, В. Ф. Афанасьев, С. А. Шубкин. – Оpubл. 01.06.99, Бюл. № 6.
 82. Патент 2006315 Россия, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутого корытного профиля / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. Ф. Рашников, В. В. Пахарев. – Оpubл. 30.01.94, Бюл. № 2.
 83. Патент 1817717 СССР, МКП 7 В 21 D 5/06. Способ поштучного производства гнутого корытного профиля с отбортовками горизонтальных полок / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, А. А. Ушаков и др. – Оpubл. 23.05.93, Бюл. № 19.
 84. 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.
 85. 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.
 86. 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.
 87. Филимонов, С. В. Методы, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 246 с.
 88. Колганов, И. М. Формообразование листовых профилей стесненным изгибом при сочетании процессов волочения и прокатки / И. М. Колганов, Г. В. Проскураков // Авиационная промышленность. – 1983. – № 1. – С.36 – 38.
 89. Куприн, П. Н. Влияние на качество гнутых профилей схем формообразования и условий профилирования / П. Н. Куприн, И. М. Колганов, Р. Р. Ахмедзянов // Перспективные методы и средства обеспечения качества летательных аппаратов : Сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – С.45 – 52.
 90. 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.
 91. Куприн, П. Н. Математическая модель устойчивости сжатой полки в ра-

- бочем калибре роликовой оснастки / П. Н. Куприн, И. М. Колганов // *Авиационная техника*. – 2003. – № 2. – С. 51 – 54.
92. 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.
93. Колганов, И. М. Обобщение результатов исследований при отработке технологии изготовления тонкостенных гнутых профилей / И. М. Колганов, П. Ю. Пашкин, О.В. Перфильев // *Новые технологии в авиастроении : Сборник научных трудов*. – Ульяновск, 2002. – С. 85 – 91.
94. Гумеров, С. Г. Технологический процесс изготовления профилей прокаткой с осадкой кромок при локальном индукционном нагреве зон пластической деформации / С. Г. Гумеров, И. В. Зверев, М.В. Харитонович, В. Н. Аргунов // *Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли*. – М. :НИАТ, 1992. – С. 94.
95. Компания «МОССКЛАД». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2006] – URL: <http://www.mocsklad.ru> (дата обращения 20.04.2011)
96. Березовский, С. Ф. Эксплуатация и ремонт оборудования профилегибочных станков / С. Ф. Березовский. – Челябинск : Металлургия. Челяб. отделение, 1991. – 175 с.
97. Компания «Прораб-Мастер». [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2005] – URL: <http://prorab-m.narod.ru> (дата обращения 20.04.2011)
98. ООО «ДЕТАЛЬ СЕРВИС». [электронный ресурс]: Рыбинск, Россия, [2006] – URL: <http://www.detalservice.ru> (дата обращения 20.04.2011)
99. 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.
100. ООО «Завод «Промстан» [электронный ресурс]: Москва, Россия, [2001] – URL: <http://www.promstan.com>. (дата обращения 20.04.2011)
101. Мищенко, О. В. Классификация профилей с периферийными элементами жесткости типа отбортовок / О. В. Мищенко // *Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: труды Всероссийской научно-практической конференции (с учетом стран СНГ), посвященной 50-летию Ульяновского государственного технического университета*. – Ульяновск, 2006. – С. 294 – 296.
102. Колганов, И. М. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей и особенности их формообразования / И. М. Колганов, В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // *Авиационная промышленность*. – 2001. – № 3. – С. 21 – 25.
103. Ренне, И. П. Пластический изгиб листовой заготовки / И. П. Ренне // *Труды Тульского механического ин-та*. – 1950. – Вып.4. – С. 146 – 162.

104. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
105. Давыдов, В. И. Производство гнутых тонкостенных профилей / В. И. Давыдов, М. П. Максаков. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 240 с.
106. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
107. Гун, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М. : Metallurgiya, 1980. – 456 с.
108. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
109. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgiya, 1986. – 688 с.
110. Арышенский, Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. – М. : Metallurgiya, 1990. – 304 с.
111. Ершов, В. И. Изготовление уголковых профилей гибкой с осадкой листовых заготовок / В. И. Ершов, В. Д. Гаврилин, Ю. Р. Медведев // Авиационная промышленность. – 1993. – № 6. – С. 39 – 41.
112. Ковка и штамповка: Справочник в 4 т. Т.4. Листовая штамповка / под ред. А. Д. Матвеева. – М. : Машиностроение, 1987. – 544 с.
113. Тришевский, И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Metallurgiya, 1980. – 288 с.
114. Тришевский, И. С. Холодногнутые гофрированные профили проката / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда, Я. В. Хижняков. – Киев : Техника, 1973. – 272 с.
115. Проскураков, Г. В. Исследование и разработка способа изменения кривизны профиля при стесненном изгибе / Г.В. Проскураков, Е. Н. Чебурахин, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 9 – 13.
116. Проскураков, Г. В. Опыт промышленного изготовления листовых профилей и деталей из них / Г. В. Проскураков, А. В. Нуждов, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1990. – № 1. – С. 3. – 4.
117. 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.
118. 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.
119. 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. — Пер. с яп. № А – 67428. – М. : ВЦП

- НТЛД, 1978. – 31 с.
120. Проскуряков, Г. В. Стесненный изгиб / Г. В. Проскуряков // *Авиационная промышленность*. – 1966. – № 2. – С. 9 – 13.
 121. Киути, М. Проблемы и оптимизация профилирования в валках / М. Киути // *Сосэй то како*. – 1974. – Т. 15. – № 165. – С. 811 – 819. – Пер. с яп. № 11802/7А. – Харьков : УкрНИИмет, 1976. – 32 с.
 122. Мищенко, О. В. Классификация профилей с периферийными элементами жесткости типа отбортовок / О. В. Мищенко // *Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: труды Всероссийской научно-практической конференции (с учетом стран СНГ), посвященной 50-летию Ульяновского государственного технического университета*. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – С. 294 – 295.
 123. Мищенко, О. В. Обобщенный классификатор гнутых профилей / О. В. Мищенко // *Тезисы докладов XXXIX научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях»*. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – С. 30.
 124. 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.
 125. Мищенко, О. В. Модель изменения основных характеристик полузакрытого профиля с периферийными элементами жесткости в процессе формообразования / О. В. Мищенко // *Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сборник научных трудов*. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – С. 207 – 209.
 126. Мищенко, О. В. Дефекты профилей с периферийными элементами жесткости типа отбортовок / О. В. Мищенко // *Прогрессивные технологии и оборудование при обработке металлов давлением : научные труды Всероссийского Сопещения обработчиков давлением*. – Ульяновск, 2007. – С. 69 – 74.
 127. Филимонов, В. И. НДС в угловой зоне при посадке заготовки на наружный контур / В. И. Филимонов, В. Н. Кокорин, О. В. Мищенко // *Тезисы докладов XXXXI научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях»*. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – С. 36.
 128. Мищенко, О. В. К расчету утонения полузамкнутых несимметричных профилей при их формообразовании в роликах / О. В. Мищенко, В. И. Филимонов, А. В. Филимонов, Е. А. Алексеевский // *Вестник УлГТУ*. – 2006. – № 2. – С. 36 – 38.
 129. Филимонов, В.И. Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В.И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 208 с.
 130. Мищенко, О. В. Влияние схем формообразования полузакрытых профилей на изменение толщины зон сгиба / О. В. Мищенко, А. В. Филимонов // *Технология металлов*. – 2007. – № 12. – С. 12 – 17.
 131. Мищенко, О. В. Влияние наличия элемента жесткости на основные ха-

- рактические зоны сгиба полузакрытого профиля в процессе его формообразования / О. В. Мищенко, А. В. Филимонов // Современные технологии в машиностроении: сборник статей XI Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2007. – С. 73 – 76.
132. Мищенко, О. В. Оценка длины зоны плавного перехода при формообразовании профилей с отбортовками / О. В. Мищенко, С. В. Филимонов, А. С. Баранов // Вестник УлГТУ. – 2010. – № 1. – С. 45 – 47.
133. Мищенко, О. В. Об оценке длины зоны плавного перехода при подгибке узких полок с отбортовками в роликах / О. В. Мищенко, А. С. Баранов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Заготовительное производство в машиностроении. – 2009. – № 12.
134. Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: пер. с ан. / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
135. Филимонов, С. В. Моделирование торцевого поджатия полки при интенсивном формообразовании профиля в роликах / С. В. Филимонов, В. В. Левщанов, В. И. Филимонов, О. В. Мищенко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – № 2. – С. 42 – 46.
136. Филимонов, В. И. Формовка угловых зон с высвобождением при профилировании / В. И. Филимонов, В. В. Левщанов // Вестник УлГТУ – 2005. – № 2. – С. 39 – 42.
137. Филимонов, В.И. Моделирование реализации аксиального сжатия при профилировании полосы / В. И. Филимонов, В. В. Левщанов // Вестник УлГТУ – 2005. – № 3. – С. 34 – 37.
138. Патент РФ на полезную модель № 81109, МПК В 21D 5/06. Роликовая оснастка для изготовления профилей из листовых заготовок с покрытием / А. С. Баранов, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, О. В. Мищенко. – Опубл. 10.03.2009, Бюл. № 7.
139. Мищенко, О.В. Совершенствование технологии изготовления гнутых профилей в роликах профилегибочных станков /О. В. Мищенко, В. И. Филимонов // Сборник аннотаций проектов Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 151 – 153.
140. Мищенко, О.В. Исследование гнутых профилей на потерю устойчивости / О. В. Мищенко, В. И. Филимонов // Тезисы докладов 43-й научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 25.
141. Мищенко, О.В. Обобщенный классификатор дефектов гнутых профилей с отбортовками / О. В. Мищенко, В. И. Филимонов // Тезисы докладов XXXXI научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – С. 35.
142. Мищенко, О.В. Оценка технологичности швеллерных гнутых профилей /О. В. Мищенко // Труды второй Всероссийской заочной молодежной научно-технической конференции «Молодежь Поволжья – науке будущее»

- го». – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – С. 90 – 93.
143. Гудков, И.Н. Разработка технологии изготовления тонкостенных перфорированных профилей методом интенсивного деформирования / И. Н. Гудков: Дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2009. – 145 с.
 144. Филимонов, А.В. Совершенствование технологии производства полузакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования. / А. В. Филимонов: Дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2009. – 186 с.
 145. Мищенко, О.В. Программа по расчету себестоимости роликовых калибров / О. В. Мищенко // Труды третьей Международной заочной молодежной научно-технической конференции «Молодежь Поволжья – науке будущего». – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – С. 104 – 105.
 146. Мищенко, О.В. Программа расчета себестоимости изготовления формирующих роликов/ О. В. Мищенко, В. И. Филимонов // Избранные труды Российской школы «Наука и технология» серия «Технология и машины обработки давлением». – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2006. – С. 184 – 187.
 147. Мищенко, О.В. О механических свойствах зетового профиля с отбортовками / О. В. Мищенко // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – С. 168 – 170.
 148. Мищенко, О.В. Анализ механических свойств гнутых профилей с отбортовками на примере Z-образного профиля типа стрингер / О. В. Мищенко, В.И. Филимонов // Прогрессивные технологии обработки материалов : научные труды Всероссийского совещания материаловедов России. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – С. 86 – 88.

Научное издание

МИЩЕНКО Ольга Владимировна
ФИЛИМОНОВ Вячеслав Иванович

**ПРОИЗВОДСТВО ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ОТБОРТОВКАМИ
В РОЛИКАХ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

ЛР №020640 от 22.10.97.

Подписано в печать 20.04.2011. Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 7,21. Тираж 100 экз. Заказ 400.

Ульяновский государственный технический университет

432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Типография УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.