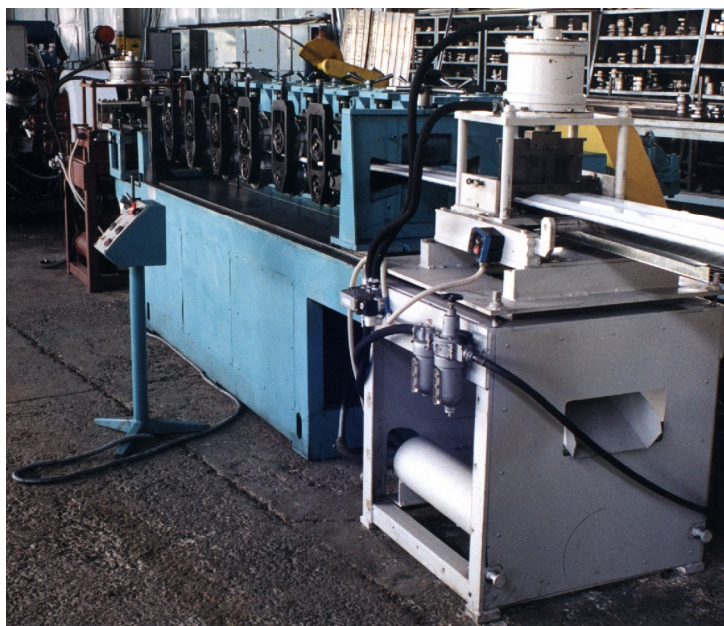


С.В. Филимонов, В.И. Филимонов

Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры



Ульяновск

Издательство УлГТУ «Венец»

2004

УДК 621.981
ББК 39.537
Ф77

Утверждено редакционно – издательским
советом университета в качестве учеб-
ного пособия для аспирантов и студентов

(доб. индекс «Механика деформируемого твердого тела»)

Филимонов С.В., Филимонов В.И.

Ф77 Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах
гнутых профилей типовой номенклатуры / С.В. Филимонов, В.И. Фили-
монов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 209 с.
ISBN 5 – 89146 – 500 – 0

Пособие предназначено для аспирантов специальности 05.03.05 «Технологии и маши-
ны обработки давлением», а также может быть полезно технологам и конструкторам, рабо-
тающим в области профилирования. Студенты, специализирующиеся в области обработки
металлов давлением (специальность 120400), здесь также могут найти материал к выполне-
нию курсовых и дипломных проектов.

Работа подготовлена на кафедре «Материаловедение и обработка металлов
давлением».

Табл. 60. Ил. 162. Библ. 190.

УДК 621.981
ББК 39.537

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор В. А. Артемьев
канд. техн. наук, доцент В. И. Котельникова

ISBN 5 – 89146 – 500 – 0

© С. В. Филимонов,
В.И. Филимонов 2004
© Оформление. УлГТУ, 2004

ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития рыночных отношений в России особенно остро стоит проблема развития промышленного производства, повышения его эффективности и улучшения качества продукции. В полной мере это справедливо и по отношению к прогрессивным технологиям без снятия стружки, в частности, к процессам производства профильной продукции на многоклетевых профилегибочных станах/станках. Профилирование обладает определенными преимуществами перед процессами прессования, гибки в штампах, кромкогибочных машинах, среди которых относительно высокая производительность, безотходность, возможность получения длинномерных сложнопрофильных деталей из заготовок с покрытием и т.д.

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

В настоящее время наиболее эффективным методом производства гнутых профилей в условиях мелкосерийного производства является **метод интенсивного деформирования**, совмещающий универсальность и эффективность, при использовании малогабаритного и сравнительно дешевого оборудования, обладающего, тем не менее, широкими технологическими возможностями.

Метод интенсивного деформирования представляет собой вынужденный компромисс между традиционным профилированием и стесненным изгибом. Его отличие от традиционного профилирования состоит в интенсификации схем формообразования: использовании меньшего числа переходов и более жестких режимов подгибки полок, закрытых калибров; специфическом задании радиусовгиба по переходам, в некоторых случаях приложении небольших по сравнению со стесненным изгибом торцевых сил к прямолинейным полкам при сравнительно невысокой скорости профилирования (от 4 до 20 м/мин). Метод стесненного изгиба был создан Проскураковым Г.В. для нужд авиационной промышленности и был предназначен для изготовления гнутых мелкосортных профилей типовых конфигураций из труднодеформируемых авиационных сплавов. В отличие от стесненного изгиба, ориентированного на осадку волнообразной заготовки при избыточной ширине заготовки и создающего большие силы торцевого поджатия, метод интенсивного деформирования не предусматривает переформовку заготовки за счет приложения осаживающих сил к поверхности заготовки. Существенным ограничением метода стесненного изгиба является весьма ограниченная номенклатура профилей. Так, изготовление профилей с шириной дна более 80 мм сопровождается остаточным прогибом

донной части профиля, а полки шириной более 30 мм при толщине стенки менее 1 мм подвержены потере устойчивости.

Широкое внедрение метода интенсивного деформирования сдерживается малой изученностью данного процесса, отсутствуют сходные технологии, использующие в полной мере свойства материалов и оборудования с целью достижения максимального технико-экономического эффекта.

Представляемая вниманию читателей книга призвана в той или иной степени восполнить указанный пробел в области профилирования.

Одной из наиболее острых проблем при изготовлении широкополочных профилей является проблема потери устойчивости периферийных элементов, в частности, проблема кромковой волнистости, возникающей на швеллерных профилях с относительной шириной полки более 40 толщин. Существующая конъюнктура рынка способствовала определению класса профилей для исследований: широкополочные профили углового, швеллерного, корытного и С-образного типов из сталей группы 08, преимущественно с покрытием, находящихся весьма широкое применение в строительной индустрии. Закономерности формообразования указанных типов профилей в последующем могут быть обобщены и на более широкую номенклатуру профилей.

Данная книга охватывает все существенные аспекты разработки технологии — от изучения состояния вопроса до внедрения результатов научно-исследовательской работы в производство.

Книга предназначена в первую очередь аспирантам, специализирующимся в области профилирования и студентам старших курсов специальности «Обработка металлов давлением».

Технологи и конструкторы проектных и научно-исследовательских организаций смогут найти в ней немало нужных расчетов и практических рекомендаций. Практически все теоретические модели доведены до численной или графической формы, что облегчит использование материала книги технологом-разработчиком или конструктором профилегибочного оборудования.

Авторы книги — кандидаты технических наук — имеют многолетний опыт разработки и внедрения технологий профилирования в действующее отечественное производство.

Книга написана на основе проведенных авторами исследований, результаты которых опубликованы более, чем в 50 статьях и изобретениях.

Рукопись книги подготовлена в Ульяновском государственном техническом университете на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением».

Авторы выражают глубокую признательность коллегам и руководителям за оказанную помощь и поддержку в процессе подготовки данной работы.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ПРОБЛЕМЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

1.1. Применение гнутых тонкостенных профилей и требования к ним

По конструктивному назначению гнутые профили можно подразделить на несущие силовые, ограждающие и декоративные малонагруженные элементы. Область их применения: элементы силового набора летательных аппаратов, рамы, обвязки, стойки бортов автомобилей, прицепов, сельскохозяйственных машин; элементы каркасов железнодорожных вагонов; стойки, связи, раскосы строительных ферм; элементы каркасов мебели, строений, сооружений и др., В зависимости от вида и величины эксплуатационных нагрузок конфигурации сечений этих профилей они могут иметь форму уголков, швеллеров, корытных, зетовых, С-образных, замкнутых сварных и специальных профилей [1]. При изготовлении гнутых профилей могут применяться различные материалы: стали, алюминиевые и титановые сплавы, некоторые виды композиционных материалов, другие виды материалов с покрытиями или без них.

1.1.1. Применение профильных деталей в авиастроении

В авиастроении применение гнутых профилей и панелей, подкрепленных ими, для постройки планера летательного аппарата связано с поисками путей снижения массы и повышения ресурса [2]. В недавнем прошлом в отечественном авиастроении использовалось порядка 200 типоразмеров гнутых профилей из авиационных сплавов разнообразных поперечных сечений, приведенных в табл. 1.1 [3].

Таблица 1.1

Применение гнутых профилей в авиастроении

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

На рис. 1.1 и 1.2 приведены диаграммы распределения типоразмеров и годового объема выпуска гнутых профилей по толщинам. Как видно из диаграмм, наиболее применимы профили толщиной от 0,8 до 1,5 мм.

Однако применение гнутых профилей в качестве стрингеров до недавнего времени считалось нецелесообразным, так как они уступают прессованным профилям в жесткости [2]. В конструкциях летательных аппаратов ведущих

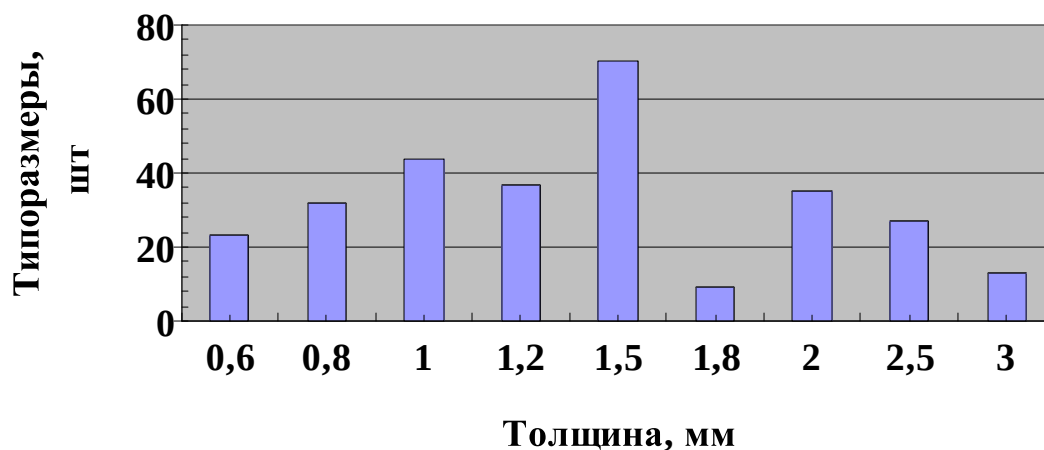


Рис. 1.1. Распределение типоразмеров применяемых профилей в авиастроении по толщинам

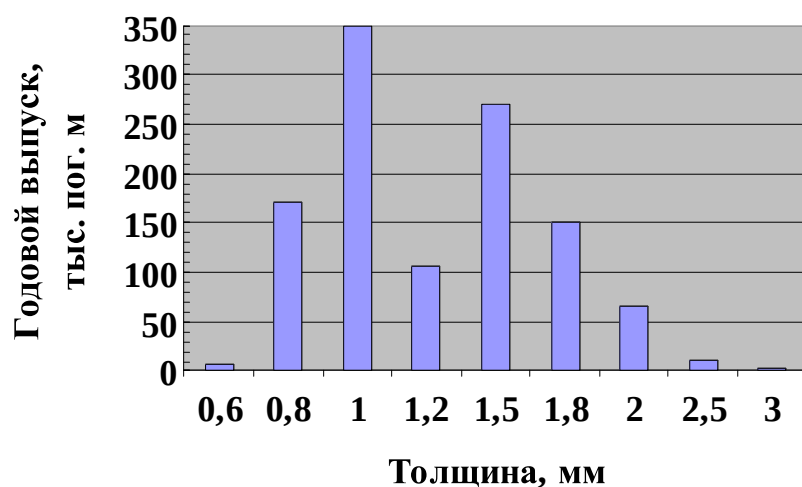


Рис. 1.2. Распределение объемов применяемых профилей в авиастроении по толщинам

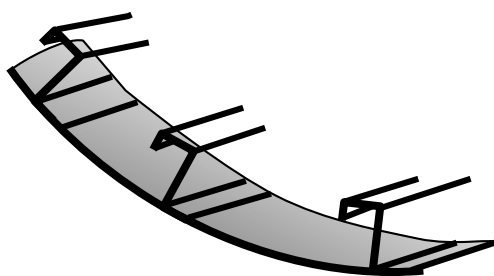


Рис. 1.3. Панель планера самолета с гнутыми профилями

зарубежных фирм «Боинг», «Локхид», «Норд-Америкэн» широко применяются гнутые профили, удовлетворяющие требованиям эксплуатации широкофюзеляжных машин [4]. В настоящее время в российском авиастроении наметилась тенденция к использованию гнутых профилей в качестве элементов силового набора планера лета-

тельного аппарата. Так, для самолета Ил-114, разработанного ОКБ им С. В. Ильюшина, «основной особенностью конструкции фюзеляжа является применение стальных из листа алюминиевого сплава стрингеров и шпангоутов, что позволяет повысить технологичность конструкции, увеличить ее коррозионную стойкость и снизить массу по сравнению с конструк-

цией, использующей прессованные профили» [5]. Оптимизация конструкции панелей (рис. 1.3) может быть достигнута за счет применения высокопрочных материалов (например, алюминий-литиевых сплавов 1421, 1430, 1451 и др.), обеспечивающих стабильность механических характеристик профиля по длине [6].

При изготовлении тонкостенных профилей прессованием наблюдается значительный разброс свойств материала по длине прессованного профиля в связи с колебаниями температурно-силовых параметров процесса. Кроме того, прессованные профили оказываются коррозионно менее стойкими по сравнению с листовыми профилями [7], что существенно ограничивает их применение в высокоресурсных грузовых и пассажирских самолетах, где условия их работы из-за наличия фюзеляжного конденсата являются весьма тяжелыми [8, 9]. В этой связи листовые профили, получаемые гибкой, обладают существенными преимуществами перед прессованными профилями: повышенной коррозионной стойкостью (в 1,5 – 2,5 раза выше, чем у прессованных), хорошим качеством поверхности, высокой точностью размеров, относительной простотой и дешевизной изготовления [10]. Развитие технологии получения новых авиационных материалов в нашей стране и за рубежом [11, 12, 13, 14] вызывает необходимость применения новых методов и способов изготовления профилей. Одним из прогрессивных методов формообразования гнутых профилей является метод стесненного изгиба (гибка с приложением торцевого сжатия) [15], позволяющий получать весьма малые радиусыгиба (до 0,3 – 0,5 толщины исходного листа), а также утолщение в зоне сгиба до 15 – 20 %. Совершенствование планера летательного аппарата существенно зависит от рационального сечения и формы и качества [16, 17] его конструктивных элементов. К настоящему времени листовые профили, изготовленные методом стесненного изгиба, применяются в качестве стрингеров на самолетах Ил-114 [18], Бе-200, Ту-334, Ан-70 [19] (рис. 1.4). В 2001 году между ОКБ им. С. В. Ильюшина и индийской компанией Hindustan Aeronautics подписано соглашение о совместном производстве многоцелевого самолета Ил-214 [20], для которого изучается вопрос использования гнутых профилей в силовом наборе планера.

Применение гнутых листовых профилей в авиастроении не ограничивается постановкой их на летательные аппараты в качестве несущих элементов. В реальности имеется возможность их более широкого применения. Профили специальных форм можно использовать при изготовлении монтажных каркасов бортового оборудования, для отделки интерьера летательного аппарата. В частности, открываются довольно притягательные перспективы использования гнутых профилей для отделки интерьеров аэровокзалов, других наземных сооружений на территориях аэродромов, различного вида ограждений.

За рубежом, в частности, во Франции аэропорт имени Шарля де Голля имеет отделку гнутыми профилями достаточно широкой номенклатуры. Номенклатура гнутых профилей из легких сплавов известной фирмы «Аэроспась-

яль» содержит лишь немногим более 3 % профилей, которые применяются в качестве силовых или несущих элементов.

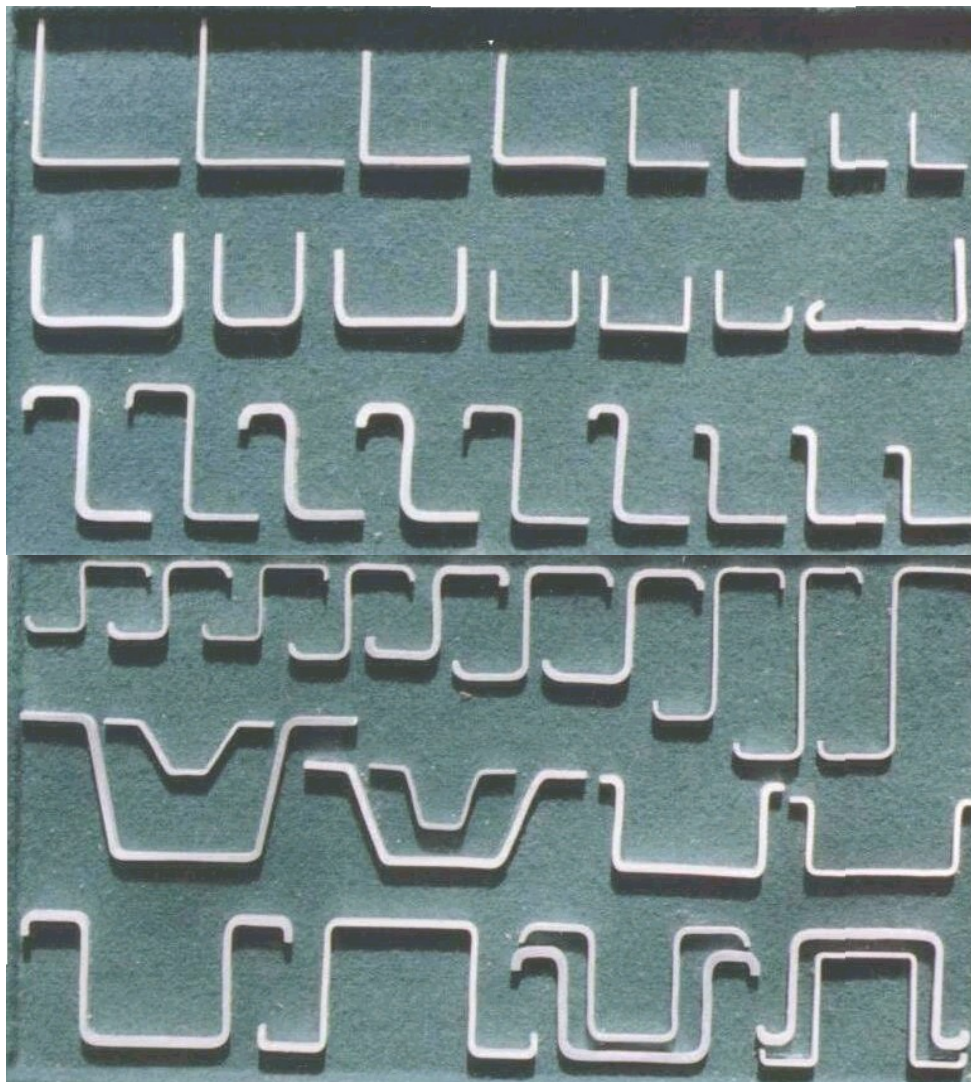


Рис. 1.4. Профили из алюминиевых сплавов, изготовленные методом стесненного изгиба

Из рассмотрения вопроса применимости прессованных и листовых профилей следует, что в ряде случаев использование гнутых профилей дает положительный эффект в сфере эксплуатации летательных аппаратов.

1.1.2. Гнутые профили в автомобильной промышленности

Автомобильная промышленность является одним из самых крупных потребителей гнутых профилей. На рис. 1.5 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 [21, 22].

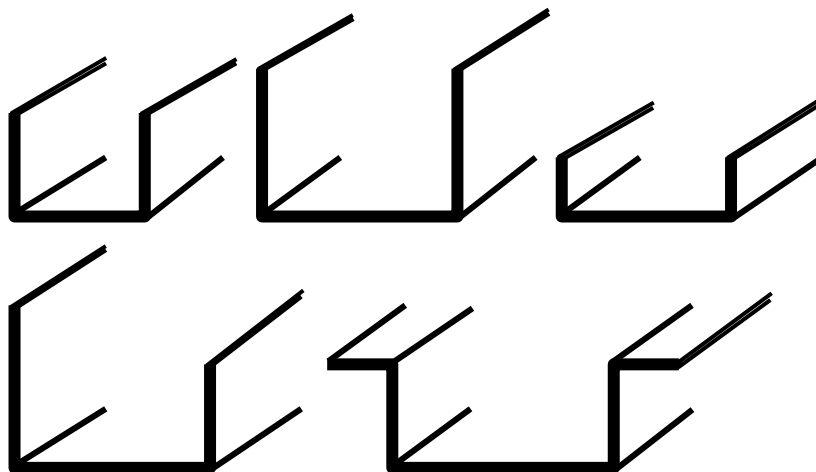


Рис. 1.5. Профили, применяемые в автомобилестроении

В табл. 1.2 приведено примерное количество профилей, применяемых в легковых автомобилях отечественного производства.

Таблица 1.2

Применение гнутых профилей в автомобилестроении

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

В табл. 1.3 представлена номенклатура изготавливаемых С – образных профилей с толщиной стенки от 1,5 до 2,0 мм. Детали изготавливаются на автоматизированной линии, включающей несколько типов оборудования [21].

Таблица 1.3

Размерные параметры изготавливаемых деталей

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

Ежегодная потребность народного хозяйства в гнутых профилях проката для автомобильной промышленности составляет несколько десятков тысяч тонн, а необходимый сортамент – более 500 профилеразмеров; 80 % из них составляют специальные гнутые профили.

1.1.3. Применение профилей в смежных отраслях машиностроения

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

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 %.

В судостроении гнутые профили с толщиной стенок до 3 мм применяют в конструкциях судов преимущественно небольшого водоизмещения (до 10 – 15 тонн) – теплоходов, траулеров, танкеров, катеров и барж – в качестве ребер жесткости, стоек, бимс, шпангоутов, планширов. Например, на судостроительном заводе «Красное Сормово» (Нижний Новгород) элементы переборок выполняют из уголков 60x30x2,5 мм, фальшборта буксира – из швеллера 40x20x2,5 мм, привальные брусья – из С – образных профилей [22].

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

Преимущества производства гнутых профилей по сравнению с изготовлением горячекатаных профилей состоят в следующем [1, 22]: использование новых конструкций профилей, допускающих сборку без сварочных операций; повышение коэффициента использования материала до 99,8 %; снижение брака в 3 – 5 раз; упрочнение до 10 – 15 %; повышение качества поверхности; низкая стоимость оборудования и технологического оснащения.

1.1.4. Применение гнутых профилей в строительстве

В строительстве к настоящему времени наблюдается настоящий бум потребления профильной продукции. Хотя в России удельное потребление стали почти в пять раз меньше, чем в странах Европейского союза, и в 1,5 раза ниже, чем мировой уровень удельного потребления [21], на российском рынке наблюдается появление новых фирм-производителей и продавцов профильной продукции. В качестве примера можно привести ЗАО «Аркада» (г. Смоленск, производитель и разработчик технологии и оборудования), фирму «Венталл» (г. Обнинск), ЗАО «Ranilla Taldom» (г. Москва, дилер одноименной финской фирмы), ООО «Караджа-Ро» (г. Москва, дилер фирмы «Lindab AB»), компанию «Roof Expert» (г. Москва, дилер одноименной шведской фирмы), фирму «Руф Интер» (г. Москва, дилер шведской фирмы КАМІ), промышленную компанию «Металл Профиль» (г. Москва), ООО «Евролайн Вест» (г. Санкт-Петербург, дилер фирмы Weckman), фирму «Московский центр кровли».

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

Гнутые профили в строительстве применяют в конструкциях подпорок стен, перегородок, сборных панелей, подвесных потолков, заборов и т. п. [26]. По анализу рекламных материалов фирм, их прайс-листов в Интернете выявлено, что наибольшее распространение имеют широкополочные профили швеллерного, С – образного, корытного типа, а также специальные профили разнообразных сечений, в основном, с покрытиями различных видов.

1.1.5. Требования к гнутым профилям

Требования к качеству гнутых профилей существенно зависят от области их применения. Условия сборки, эксплуатации и ремонта конструкций накладывают определенные условия на качество профильной продукции, которые обычно отражаются в регламентирующей конструкторской и технологической документации в виде общих или специфических требований. Например, в авиастроении приняты требования, представленные в табл. 1.4 [2, 3, 4].

Таблица 1.4

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/м	–
Микронеровности в зоне сгиба	Не более 30 мкм	По высоте
Отклонения размеров сечения	Не более 0,2 мм	Кроме толщины
Допуск на толщину	Как в исходном листе	РТМ 1.4.1630-86
Остаточная деформация	Не более 20%	–
Механические свойства	По ОСТ 190125-83	–

В машиностроении применяют требования, сведенные в табл. 1.5 [23].

Таблица 1.5

Требования к гнутым профилям согласно ГОСТ 11414 – 76

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

Следует отметить, что приведенные требования не являются исчерпывающими. Заказчики профильной продукции обычно резюмируют свои требования к качеству профилей в технических условиях на их поставку, где отражаются и специфические требования, как например, допуск на радиусы зон сгиба в авиастроении или качество поверхности и линейные размеры в строительной индустрии.

1.2. Сравнительная эффективность различных методов формообразования гнутых профилей и их влияние на возникновение дефектов периферийных элементов

Гибку профилей из листовых заготовок можно производить различными методами согласно классификатору, приведенному на рис. 1.6. Различные методы изготовления профилей имеют свои области применения и различную эффективность в отношении обеспечения бездефектности периферийных элементов.

При изготовлении профилей в кромкогибочных машинах с поворотной траверсой (рис. 1.7а) возможно изготовление длинномерных профилей со значительной шириной полок без существенных дефектов периферийных элементов [27]. Существуют кромкогибочные машины, позволяющие изготавливать профили по схеме стесненного изгиба [28, 29]. Однако, в схемах с торцевым поджатием и небольшим усилием прижима (рис. 1.7б) возможна потеря устойчивости кромки заготовки [30]. 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 типовых размеров профилей по сечению), низкая производительность.

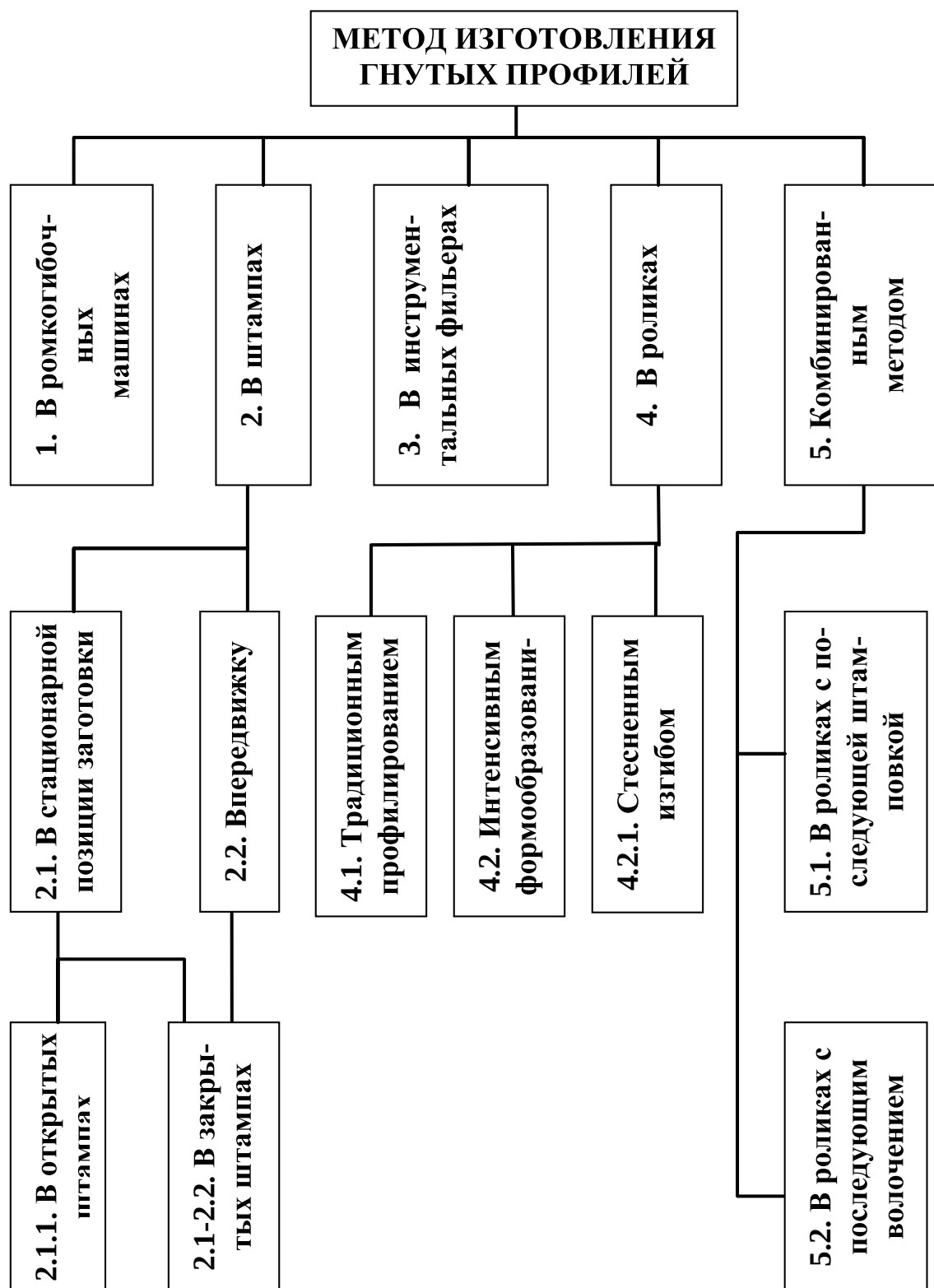


Рис. 1.6. Классификатор методов изготовления гнутых профилей

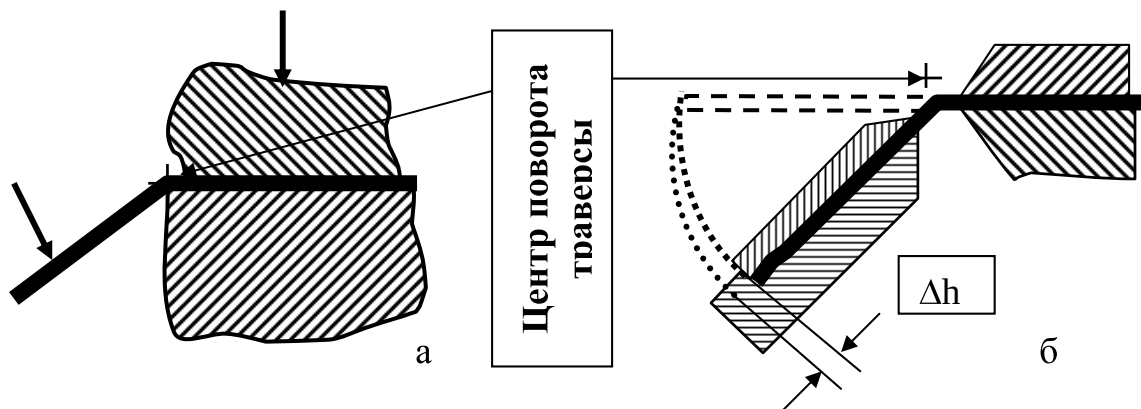


Рис. 1.7. Гибка профиля в кромкогибочных машинах:
а – свободная гибка; б – стесненный изгиб

Гибка профилей в штампах может осуществляться при стационарной позиции заготовки (схема 2.1) или впередвижку (схема 2.2). Гибка при стационарной позиции заготовки в открытых штампах [31 – 35] допускает разнообразные схемы (рис. 1.8). Ее недостатком является низкая точность деталей и ограниченные технологические возможности в отношении номенклатуры изготавливаемых профилей.

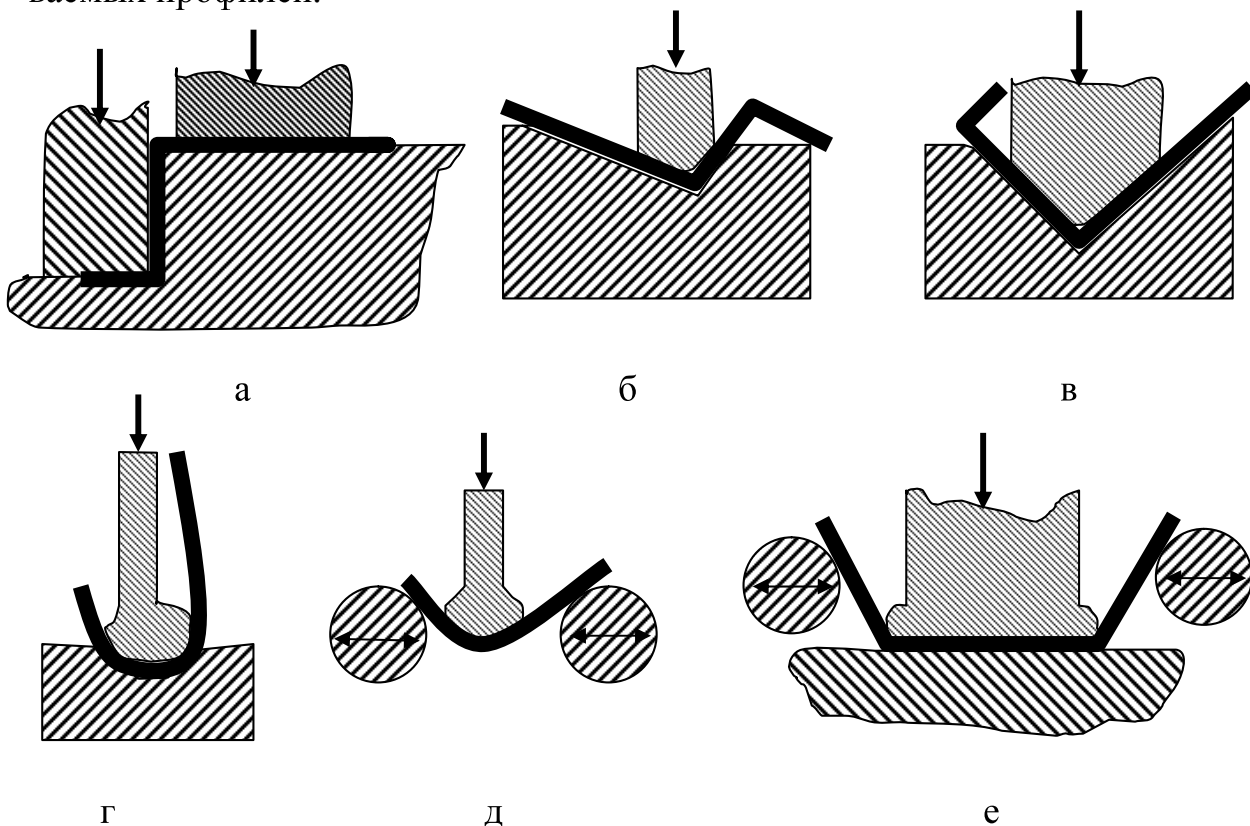


Рис. 1.8. Схемы гибки профиля в открытых штампах: а – отгибкой; б, в, г – движением пуансона в полость жесткой цельной матрицы; д – движением пуансона между регулируемыми цилиндрическими оправками; е – движением пуансона между регулируемыми оправками с созданием противодействия

Формообразование профилей при стационарной позиции заготовки в закрытых штампах (схема 2.1.2) обеспечивает отсутствие дефектов периферийных элементов типа кромковой волнистости, однако возможны другие дефекты, связанные с особенностями формообразования. Так, в схеме торцевого поджатия [36] возможна потеря устойчивости осаживаемой полки вблизи зоны сгиба (рис. 1.9а). При формовке эластичной средой (рис. 1.9б) периферийные элементы могут быть получены бездефектными, однако существуют проблемы базирования заготовки и обеспечения точности размеров элементов детали по ширине [37]. Использование эластичных сред расширяет технологические возможности изготовления деталей небольшой длины с прямолинейными и криволинейными бортами выпуклой или вогнутой формы. При формовке за один-два перехода возможна гибка на радиус, равный толщине заготовки при наборе утолщения в уголковогой зоне до 8...23 % и пружинении менее 1° [38].

В схемах осадки волнообразной заготовки (рис. 1.9в) основным дефектом горизонтальных полок является их неплоскостность, связанная со спецификой процесса формообразования, из-за эффекта пружинения [39]. Существенным ограничением технологии производства профилей в штампах являются ограниченная длина получаемых деталей, низкая производительность.

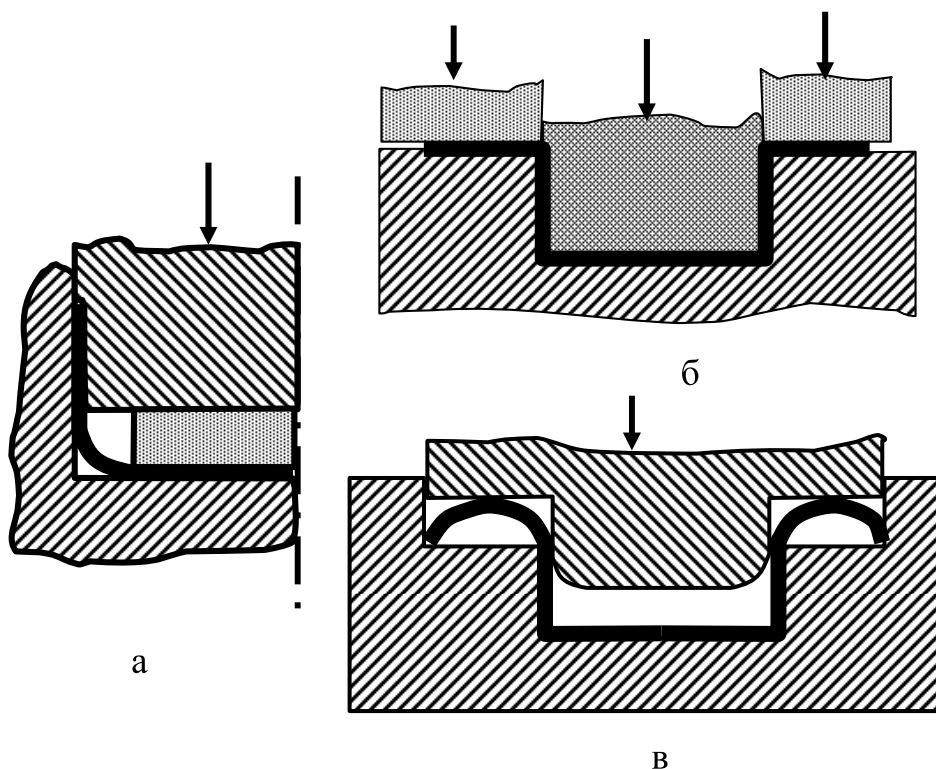


Рис. 1.9. Схемы гибки профиля в закрытых штампах: а – схема с торцевым поджатием; б – формовка эластичной средой; в – осадка волнообразной заготовки

С целью преодоления указанных недостатков была предпринята попытка создания способа, позволяющего производить формовку профиля вперёдвжку (схема 2.2, рис. 1.6) с удержанием прилегающих к очагу пластической деформации участков обжатием их в пределах упругости [40]. Данным способом удастся получить длинномерные профили с радиусами зон сгиба меньше допустимых в отсутствие неплоскостности периферийных элементов, однако на них имеются следы зон перекрытия при общем высоком уровне остаточных напряжений.

Метод изготовления профилей в инструментальных фильерах [41, 42] реализуется по схеме, изображенной на рис. 1.10. При волочении через фильеру возможно растяжение периферийных элементов, особенно в случае реализации стесненного изгиба (избыточная ширина заготовки по отношению к ширине развертки калибра), что приводит к кромковой волнистости. Данный метод не получил широкого распространения из-за сложности изготовления фильер, больших усилий формообразования, низкой стойкости фильер, ограниченных технологических возможностей.

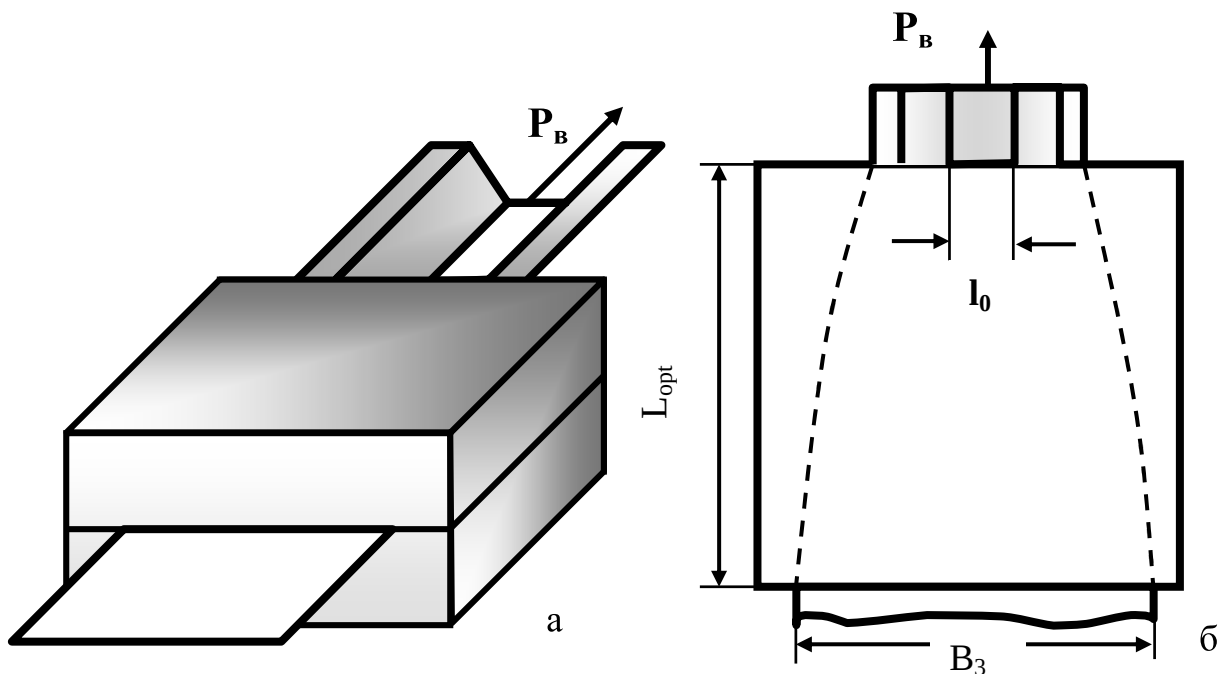


Рис.1.10. Волочение в инструментальной фильере: а – общий вид; б – геометрические параметры процесса

Модификацией схемы 3 является способ гибки профилей проглаживанием по пуансону [43]. Способ идеально подходит для формообразования профилей из волокнистых композиционных материалов, не допускающих больших степеней деформаций изгиба вдоль волокон. Суть способа состоит в сжатии волнообразного участка заготовки в угловой зоне (рис. 1.11). Способ недостаточно разработан и в промышленности в настоящее время не применяется.

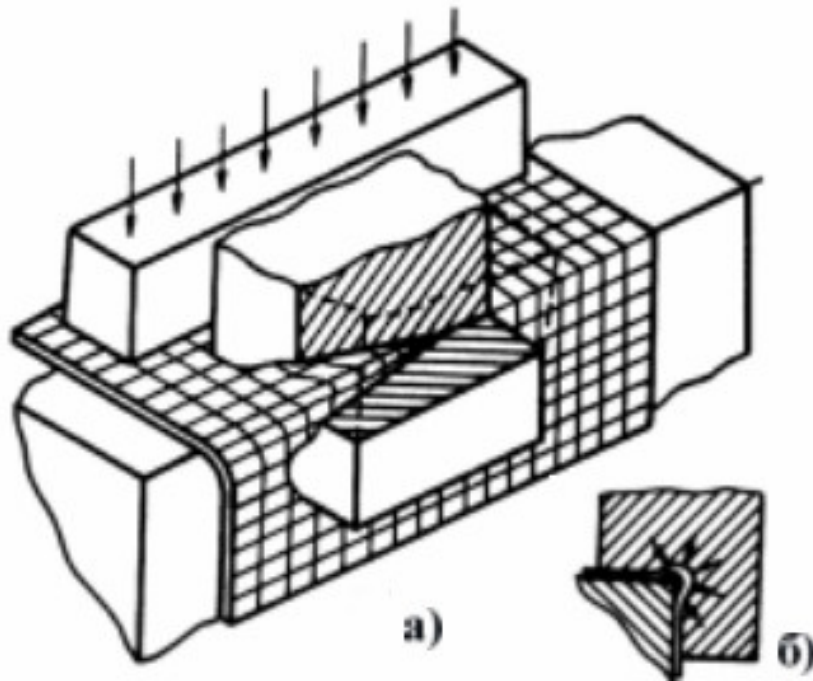


Рис. 1.11. Гибка проглаживанием по пуансону

Формообразование профилей в роликах является наиболее универсальным методом производства профильной продукции, которое может быть условно разделено на традиционное профилирование, интенсивное деформирование и стесненный изгиб (схемы 4.1, 4.2 и 4.3 на рис. 1.6 соответственно). В табл. 1.6. приведены характерные отличительные черты каждого из этих методов формообразования профиля в роликах.

Традиционное профилирование предусматривает использование многоклетевых профилегибочных машин с числом клетей от 10 до 52 [44], причем, катающие диаметры роликов обычно более 300 мм [22]. Скорость профилирования располагается в диапазоне от 30 до 60 м/мин. Оборудование для традиционного профилирования является крупногабаритным: длина производственных линий профилирования достигает нескольких десятков метров. Это требует значительных производственных площадей, складских территорий для хранения технологической оснастки, что связано с высокими затратами на содержание производственных помещений. Освоение одного типа профиля достигает 500 тыс. руб. в ценах 2002. Кроме того, капитальные вложения на приобретение таких линий достаточно высоки: от 150 до 350 тыс. американских долларов за линию российского производства и от 300 тыс. долларов за линию зарубежного производства [45, 46]. Для сравнения, стоимость автоматизированных линий интенсивного формообразования отечественного производства составляет от 50 до 100 тыс. долларов, а освоение одного типа профиля не превышает 200 тыс. руб. в ценах 2002 года. Ежегодно в России внедряется несколько десятков линий и станков для производства профилей методом интенсивного деформирования в роликах. Например, разработчики технологий профилирования в г.

Ульяновске ежегодно внедряет до десяти линий и отдельных станков для производства более чем 100 типоразмеров профилей [19].

Таблица 1.6

Характеристика методов формообразования профиля в роликах

Характерный 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, м/мин	30...60 (до 180)	6...20	2...15
3. Углы подгибки за переход, град.	8..12	10...40	10...40*
4. Тип калибра	Открытый с высвобождением	Закрытый	Закрытый
5. Форма калибра	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Волнообразная
6. Диаметры роликов (по межосевому расстоянию)	D	$(0,4...0,7) \cdot D$	$(0,5...0,7) \cdot D$
7. Число переходов	N	$(0,5...0,7) \cdot N$	$(0,4...0,7) \cdot N$
8. Приложение дополнительных сил	—	Аксиальная, торцевая**	Торцевая, осадка волнообразной заготовки
9. Правильное устройство	Не обязательно	Обязательно	Обязательно
10. Технологические возможности: а) Н/С (отношение высоты профиля к ширине его дна) б) r_b/s_0	Любые $r_b/s_0 > (r_b/s_0)_{\text{допуст.}}$	Любые $r_b/s_0 > 0,5$	$H/C \leq 2$ для прямой схемы; $H/C < 5$ для обратной схемы $r_b/s_0 > 0$
* — измеряется по наклону прямолинейного участка боковой стенки; ** — для специальных схем			

Отметим, что при традиционном профилировании проблема дефектов периферийных элементов решается простым увеличением числа задействованных клеток, в то время как при интенсивном формообразовании необходимо приме-

нять специальные технологические приемы для обеспечения качества получаемой продукции.

На рис. 1.12 приведена угловая зона, характеристики различных методов и соответствующие эпюры окружных деформаций в зоне сгиба. Из табл. 1.6 видно, что метод интенсивного деформирования обладает рядом преимуществ перед традиционным профилированием в сфере мелкосерийного производства и имеет более широкие технологические возможности в части изготовления широкополочных профилей по сравнению со стесненным изгибом.

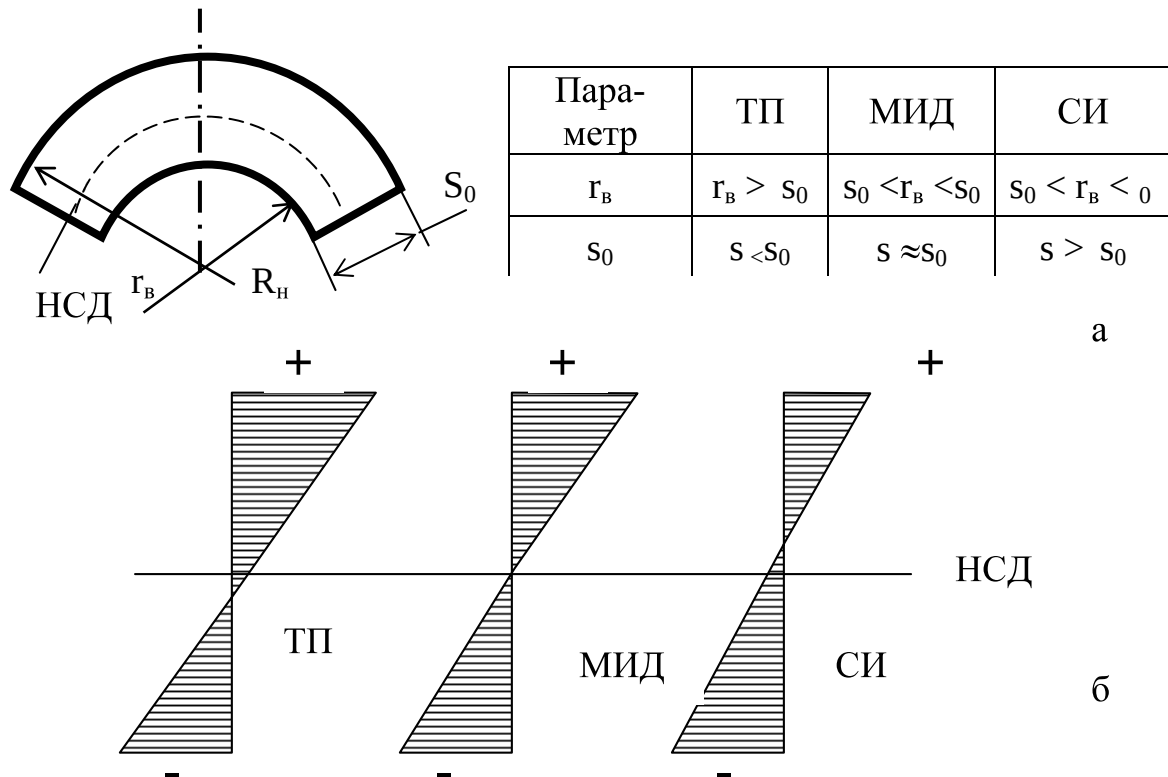


Рис. 1.12. Угловая зона и окружные деформации при различных методах изготовления профиля в роликах: а – зона сгиба и характеристики методов; б – эпюры окружных деформаций

При стесненном изгибе достигается малый радиус зон сгиба (меньше допустимого для данного материала) и утолщение в уголке за счет придания заготовке волнообразной формы с последующей ее осадкой [15, 47]. Возможны схемы с торцевым поджатием при плоской стенке, однако для набора утолщения в угловой зоне данная схема пригодна лишь для профилей с малой шириной полки (до $(20...30)S_0$) [48, 18]. Увеличение ширины полки приводит либо к потере устойчивости (неплоскостности полки в поперечном направлении), либо к кромковой волнистости.

Предпринимались попытки комбинирования различных методов с целью обеспечения повышенной жесткости профиля за счет утолщения в угловой зоне. Так, в работе [39] описана технология, предусматривающая изготовление волнообразной заготовки в роликах с последующей осадкой ее в закрытом

штампе до получения окончательной конфигурации детали (схема 5.1, рис. 1.6). К сожалению, процесс предварительного формообразования не свободен от указанных выше недостатков, когда речь идет о производстве широкополочных профилей из стали.

Известна технология производства длинномерных профилей повышенной жесткости из дисперсно упрочненного композита АБМ-1, в которой профилирование в роликах с нагревом до 600°C совмещалось с волочением заготовки (схема 5.2, рис. 1.6) с помощью цепного привода ЦС-18 при скорости 6 м/мин [49, 50].

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 [51].

1.3. Причины возникновения дефектов профилей при их формообразовании в роликах

Разработка технологии производства гнутых профилей в роликах требует учета ряда факторов процесса формообразования с целью предупреждения их возможных дефектов. На рис. 1.13 приведен классификатор дефектов профилей, возникающих в процессе формообразования профиля.

Дефекты пространственной формы возникают вследствие различного вида нарушений режимов и схем формообразования. Продольный прогиб профиля (рис.1.13, схема 1.1.; рис. 1.14а) может иметь место вследствие следующих причин: ошибка в выборе диаметров формирующих роликов [52], неверное положение оси профилирования в вертикальной плоскости [53], неравномерный зазор роликового калибра [4], отклонения ширины заготовки [54], неверная настройка правильного устройства [55]. Эта разновидность дефектов наблюдается на профилях практически всех типоразмеров, что связано с различием продольных деформаций подгибаемых полок и дна профиля вследствие нарушения режимов и схем формообразования [56]. Продольный прогиб до некоторой степени устраняется настройкой правильного устройства, однако его воздействие при большой кривизне выходящего профиля может приводить к появлению неустраняемого дефекта – кромковой волнистости (рис.1.13, схема 3.1).

Саблевидность профиля (рис.1.13, схема 1.2; рис.1.14б) происходит в виду следующих причин: неверное положение оси профилирования в горизонтальной плоскости [53], неравномерный зазор роликового калибра [4], боковое смещение заготовки на предварительных переходах [54], саблевидность исходной заготовки (более 3 мм/м) [4], ошибочная схема формообразования несимметричного профиля [57], неверная настройка правильного устройства [55]. Данный вид дефектов возникает весьма редко в процессах формообразования симметричных профилей при соблюдении схем и режимов их производства.



Рис. 1.13. Классификатор дефектов гнутых профилей

Скрутка профиля (рис. 1.13, схема 1.3, рис. 1.14в) может происходить из-за ошибок в выборе схем формообразования [57], смещения оси профилирования [53], неравномерности зазора в роликовых калибрах [4], отклонений параметров заготовки (ее саблевидности, разнотолщинности или избытка ее ширины при использовании закрытых роликовых калибров), неправильной настройки правильного блока [4]. Наибольшей скрутке подвержены несимметричные профили, хотя в большинстве случаев скрутка может быть устранена соответствующей настройкой правильного устройства [57, 4]. 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 [58], за счет комбинации подгибки и разгибки меньшей по ширине полки [1], а также за счет поворота сечения профиля относительно оси профилирования.

Отклонение размеров сечения профиля от номинальных размеров проявляется в недоформовке профиля по высоте (рис. 1.13, схема 2.1; рис. 1.14г,) отклонениях по ширине (рис.1.13, схема 2.2; рис.1.14д), пружинении (рис.1.13, схема 2.2. рис. 1.14е) и отклонениях кривизны зон сгиба (рис.1.13, схема 2.4; рис. 1.14ж). Недоформовка профиля по высоте связана с заниженной шириной заготовки или с раскрытием роликового калибра. Отклонения по ширине профиля часто происходят из-за изменения кривизны зоны сгиба в процессе деформирования, связанной с пружинением. При разгрузке (выходе профиля из калибра очередной пары роликов) возникает уширение профиля даже в отсутствие значительных отклонений угловгиба [58]. При традиционном профилировании пружинение является значительным, поэтому к последнему переходу угол подгибки уменьшают, поскольку величина пружинения $\Delta\Theta$ прямо пропорциональна углу подгибки Θ [58, 59]:

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

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

При стесненном изгибе пружинение может быть даже отрицательным в связи с осадкой заготовки в замкнутом калибре [57]. При интенсивном деформировании пружинение несколько меньше, чем при традиционном профилировании, однако его необходимо учитывать при разработке схем формообразования.

Депланации элементов готового профиля регламентируются соответствующими нормативными документами [60, 4]. Кромковая волнистость (рис. 1.13, схема 3.1; рис. 1.14з) – наиболее часто встречающийся дефект при изго-

товлении тонкостенных широкополочных профилей [61]. При высокой жесткости подгибаемых полок может иметь место как кромковая волнистость, так и излом полки. Эти виды дефектов являются причиной, препятствующей сокращению числа переходов [62].

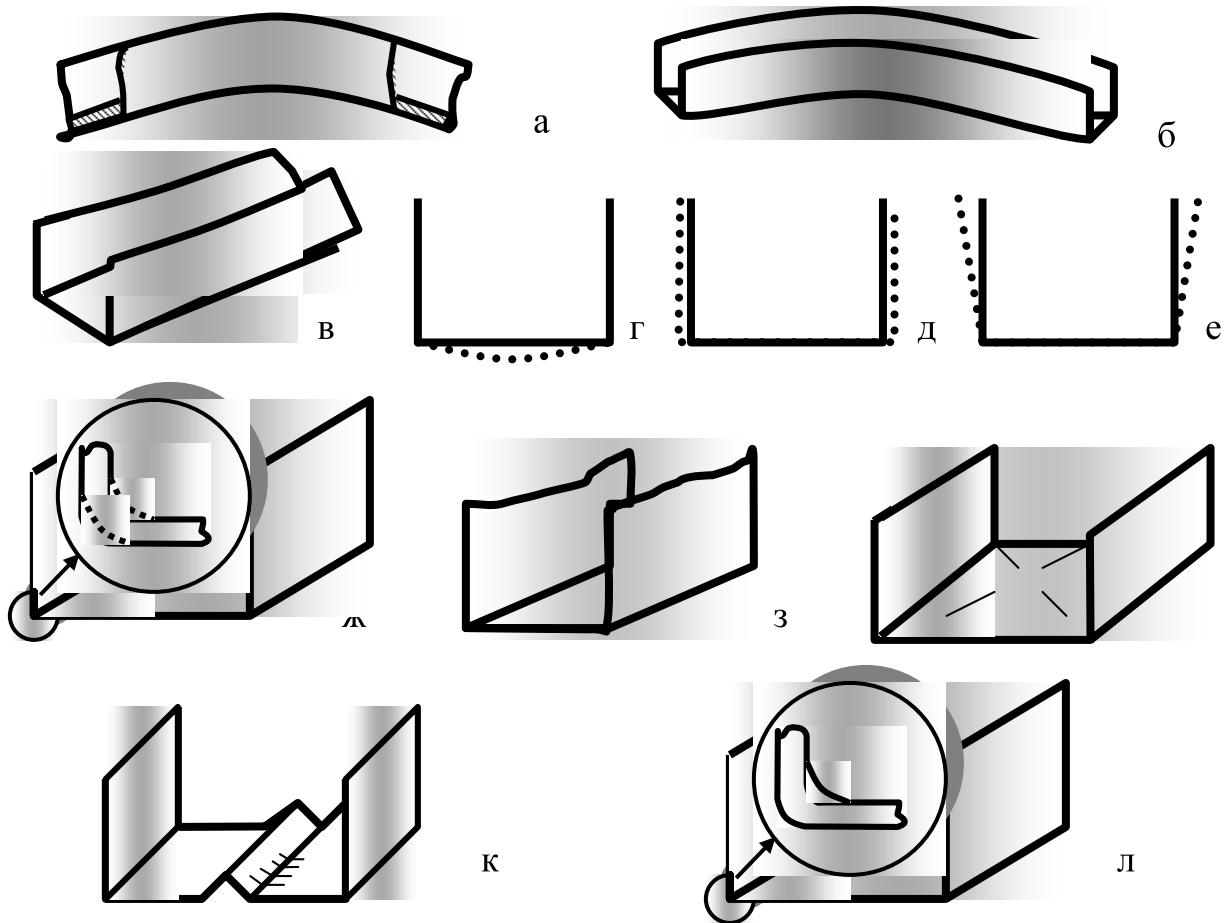


Рис. 1.14. Дефекты гнутых профилей: а – продольная кривизна; б – саблевидность; в – скрутка; г – недоформовка по высоте; д – отклонение размера по ширине; е – пружинение; ж – отклонение по радиусу; з – кромковая волнистость; и – хлопун; к – мелкие гофры; л – отслоение покрытия

"Хлопуны" на донной части профиля (рис. 1.13, схема 3.2; рис. 1.14и) возникают при изготовлении широких профилей и профилей с большим числом зон сгиба, жесткость подгибаемых полок которых достаточно велика, чтобы противостоять потере устойчивости. При этом в донной части профиля возникает прогиб типа горба, который при осадке порождает "хлопуны" – области локального выпучивания.

Возникновение мелких поперечных гофр вблизи элементов жесткости (рис.1.13, схема 3.3; рис 1.14к) наблюдается крайне редко и только при толщинах заготовки менее 1.0 мм в случаях осадки элементов жесткости типа рифтов. Причиной их является, по-видимому, неблагоприятное сочетание силовых факторов при осадке участка донной части заготовки с резким изменением жесткости в локальной области.

Дефекты поверхности профиля проявляются в виде задиров, царапин, разрушения покрытия (рис. 1.13, схемы 4.1 – 4.3), а также его расслоения (рис. 1.13, схема 4.2; рис. 1.4л). Причиной задиров, царапин и нарушений покрытия могут быть жесткие схемы формообразования (большие контактные напряжения) [64, 65], неудовлетворительное качество поверхности формующих роликов [57], неравномерный зазор в калибре [4], избыточная ширина заготовки при изготовлении профиля в закрытых калибрах [63]. При изготовлении тонкостенных стальных профилей без покрытия проблем, связанных с указанными поверхностными дефектами, обычно не возникает. Однако нарушение поверхности профиля может происходить на профилях из алюминиевых сплавов, особенно при наличии плакирующего слоя.

1.4. Схемы и действующие факторы процесса формообразования профилей в роликах

Схема формообразования профиля определяет конфигурацию роликовых калибров по переходам и является одним из важнейших факторов технологического процесса профилирования. Профили различных типоразмеров изготавливают по различным схемам в зависимости от наличия и вида покрытия, также элементов жесткости на полках профиля. Следует отметить, что в последние годы значительно расширилась номенклатура профилей с элементами жесткости [66] при увеличении их числа на одном типоразмере профиля (рис. 1.15) [67]. Рассмотрим схемы формообразования профилей в порядке возрастания их сложности, опуская рассмотрение симметричных уголковых профилей, обычно не представляющих значительных проблем в отношении их изготовления.



Рис. 1.15. Профиль с элементами жесткости фирмы «Кнауф»

1.4.1. Несимметричные уголковые профили

Несимметричные уголковые профили формуют по схемам, предусматривающим подгибку меньшей полки в роликах основных переходов или в промежуточных вертикальных клетях [68]. Более благоприятной является схема с одновременной подгибкой полок на углы, соотношение которых обратно пропорционально соотношению ширин подгибаемых полок [69].

Интенсивная схема формообразования неравнополочных уголков, уменьшающая число переходов, радиус зоны сгиба и предотвращающая винтообразное скручивание [70], предусматривает изгиб заготовки на первом переходе в виде дуги с радиусом R , определяемом из соотношения:

$$\sin\left[\frac{B_3}{2 \cdot R}\right] = \frac{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}{2 \cdot R},$$

где b_1, b_2 – ширина полок готового профиля, мм; B_3 – ширина заготовки, мм. Затем криволинейные участки полок подгибают на углы, отношение которых обратно пропорционально отношению длин подгибаемых полок, и производят окончательную осадку криволинейных полок с обеспечением их торцевого поджатия за счет избытка ширины заготовки.

Уголки повышенной жесткости можно также производить, формуя швеллерный профиль стесненным изгибом и разрезая его продольно дисковыми ножницами в окончательном переходе, с последующей правкой двух заготовок в правильном устройстве, установленном за блоком разрезки [71]. Уголки с широкими полками из материалов с покрытием можно получать традиционным профилированием швеллера с его последующей разрезкой [72].

Уменьшение продольного скручивания может достигаться перегибом полок и их последующей разгибкой [73]. При наличии элементов жесткости на одной из полок уголкового профиля можно изготавливать с применением специальных схем [74], например, с устранимым технологическим рифтом [66].

При изготовлении уголков из малопластичных материалов, с целью исключения трещинообразования, применяют схему, в которой заготовке придают вертикальными роликами прогиб в межклетьевом пространстве [75].

Производство уголковых профилей из материалов без покрытий с умеренной шириной полок практически не ставит технологических проблем перед разработчиком. Однако разработка технологии изготовления широкополочных уголков, уголков с элементами жесткости типа рифтов, элементами двойной толщины, отбортовками [76] из материалов с покрытием вызывает необходимость изучения возможностей специальных схем формообразования с целью предотвращения потери устойчивости периферийных элементов.

1.4.2. Швеллерные профили

Профили швеллерного типа изготавливают преимущественно по схемам формообразования, ориентированным на уменьшение числа переходов, предотвращение кромковой волнистости и продольного прогиба профиля, а также обеспечение характеристик точности поперечного сечения профиля. На рис. 1.16 приведены конфигурации простых профилей швеллерного типа.

Симметричные равнополочные профили (рис. 1.16а), с соотношением ширины дна и полки не более двух, можно изготавливать по схеме стесненного изгиба [77] осадкой заготовки с большими радиусами зон сгиба в окончательном переходе до получения их требуемых значений (рис. 1.17).

Углы подгибки по переходам до получения заготовки с вертикальными полками определяют в соответствии с формулой:

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

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

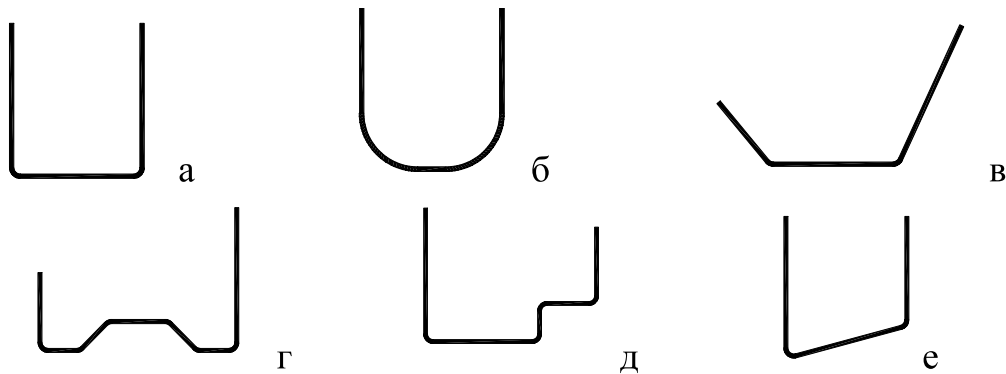


Рис. 1.16. Конфигурации простых профилей швеллерного типа

Указанными способами можно изготавливать профили с шириной полки до 20 – 25 толщин заготовки при толщине металла более 0,8 мм. При выходе из этого диапазона наблюдается потеря устойчивости вертикальной полки при осадке с отклонением от плоскостности на готовом профиле или повреждение кромки (особенно у профилей из пластичных материалов с плакировкой). Другие возможные схемы формообразования швеллерных профилей стесненным изгибом в роликах указаны в работе [78].

Швеллерные профили типа желобов (рис. 1.16б) можно изготавливать по схемам стесненного изгиба [78], если прямолинейные участки не превышают 30 – 35 толщин заготовки. В этом, же диапазоне работает схема (рис. 1.18), в кото-

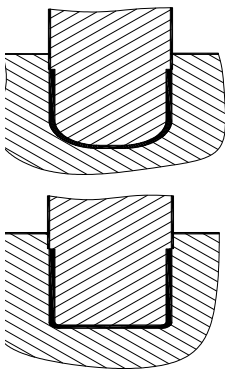


Рис. 1. 17. Схема формообразования симметричного равнополочного профиля

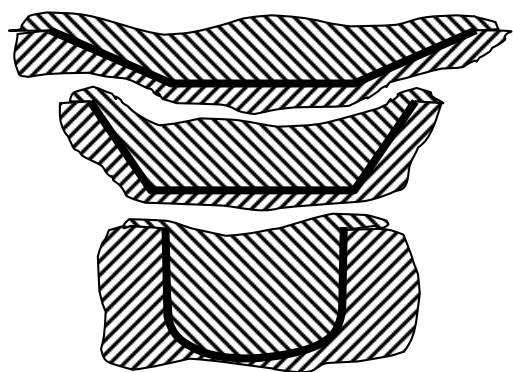


Рис. 1. 18. Схема формообразования U – образного профиля

рой, с целью повышения точности сечения, подгибку полок совмещают с разгибкой локальных участков донной части профиля [80].

Кромковая волнистость чаще возникает при изготовлении не равнополочных швеллеров (рис.1.16в), что связано с различием приобретаемых деформаций полков [58]. Процесс формообразования также сопровождается продольным прогибом и винтообразным скручиванием профиля. Имеется ряд схем формообразования для предотвращения скручивания (рис. 1.19). На рис. 1.20 приведена схема формообразования швеллера с поворотом частей его сечения, в которой моменты сопротивления изгибу частей сечения относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести сечения профиля, равны между собой [81]. На рис. 1.21 показаны режимы подгибки полков по данному способу.

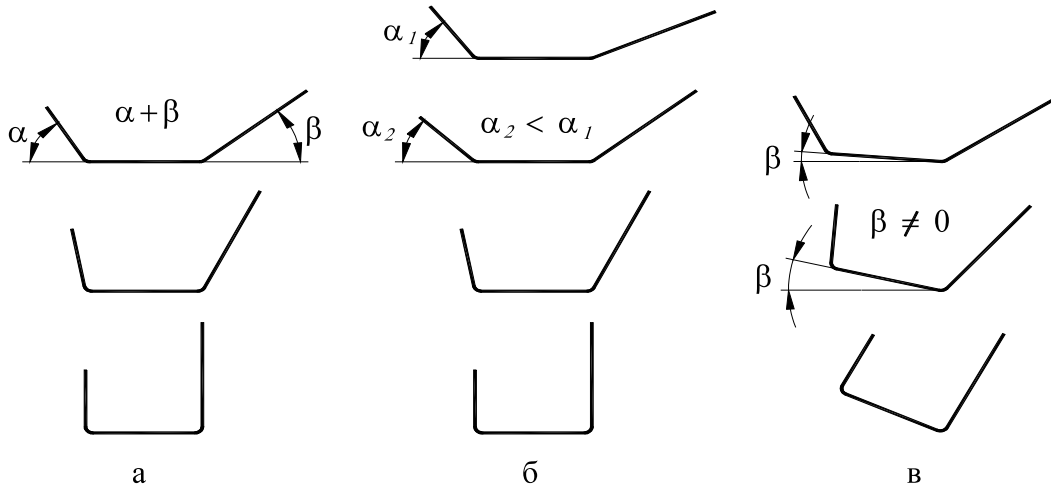


Рис. 1.19. Схемы формообразования, предотвращающие скрутку несимметричных профилей: а – подгибкой на различные углы; б – комбинацией подгибки и разгибки; в – поворотом сечения профиля относительно оси профилирования

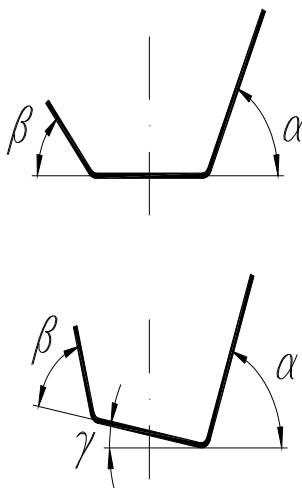


Рис. 1.20. Принципиальная схема формообразования неравнополочного профиля

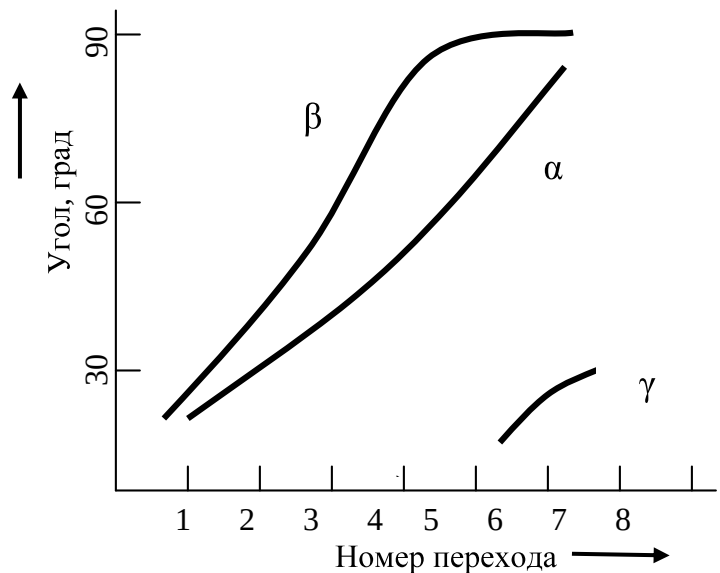


Рис. 1.21. Углы, определяющие режим подгибки неравнополочного швеллера

Широкополочные профили с узким дном при значительном повороте сечения имеют обычно несколько искривленные полки и заусенцы или зажимы у торцов. Некоторым усовершенствованием рассмотренной схемы является схема [82], согласно которой, в каждом переходе профиль размещают с заданной ориентацией одной из главных центральных осей инерции. Продольное скручивание профиля также устраняют поворотом сечения неравнополочного профиля в предчистовом переходе [83] в сторону большей полки на угол:

$$\gamma = \varphi \cdot (3-4)^\circ,$$

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

В этом случае дно профиля в остальных переходах располагают горизонтально.

Для уменьшения винтообразного скручивания, также применяют схему формообразования (рис. 1.22) с уравниванием изгибающих моментов, прикладываемых к обеим полкам, путем приложения поперечного сжимающего усилия к полке большей длины перпендикулярно плоскости ее торца [84]. Значительная торцевая сила, прикладываемая к большей полке, может приводить к волнистости ее кромки. Повышение качества угловой зоны достигается применением схемы с высвобождением внутреннего контура на каждом из переходов (рис. 1.23) и приложением к торцам заготовки нормального сжимающего усилия P_i , которое определяется формулой [85]:

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

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

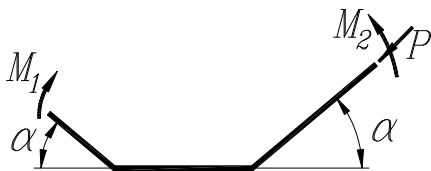


Рис. 1.22. Схема действия силовых факторов на полки

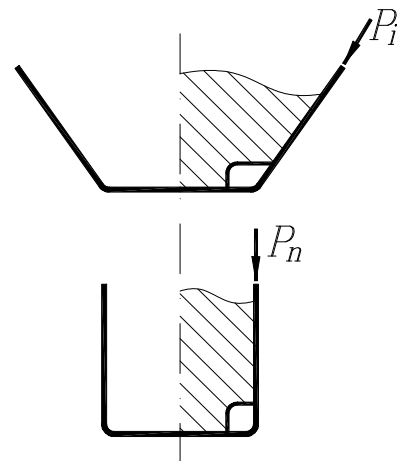


Рис. 1.23. Схема гибки швеллера с торцевым поджатием

Схема реализуется за 10 переходов. Уменьшение числа переходов до шести при ширине полок профиля более $30S_0$ приводит к кромковой волнистости при

значениях, близких к 40 – 50 % от значения критической силы, приведенной в вышеприведенной формуле.

Изготовление швеллерных профилей с элементами жесткости типа продольных рифтов в донной части (рис. 1.16г) отличается режимами подгибки полок от технологии формообразования швеллеров с гладким дном. В последнем случае углы подгибки могут быть на 2 – 4° больше, чем в первом, что объясняется наличием возможности "смягчения" схемы формообразования за счет прогиба донной части профиля. На рис. 1.24 изображена схема формообразования равнополочного профиля с гофрами жесткости, предназначенная для исключения трещинообразования у основания гофр и предупреждения волнистости подгибаемых полок [86]. Здесь формование гофров осуществляют в предчистовом переходе радиусом у основания гофра на 20 – 30% меньше конечного радиуса мест изгиба профиля при освобождении подогнутых элементов от зажатия валками, а в чистовом переходе освобождают от зажатия гофры. Данная схема пригодна лишь для формовки гофр небольших размеров, в то время как увеличение размеров гофр приводит к большой боковой утяжке материала и кромковой волнистости.

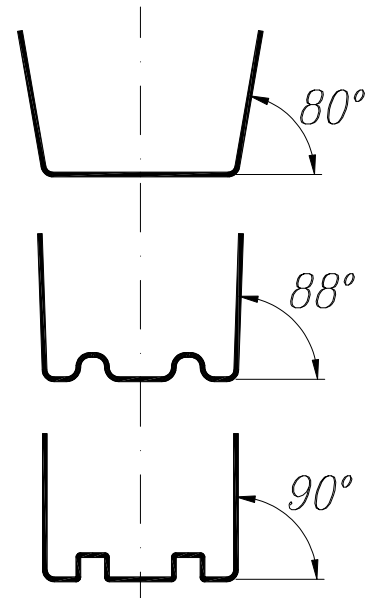


Рис. 1.24. Схема формовки гофр на швеллерном профиле

В схеме формообразования неравнополочного швеллера с гофрированной стенкой предусматривается восемь переходов (рис. 1.25), в которых, наряду с подгибкой полок на различные углы, производят и поворот профиля относительно оси профилирования, причем гофры формуют на третьем переходе [87]. Схема неприменима для профилей с шириной хотя бы одной полки более 40 толщин материала из-за возникновения кромковой волнистости.

Улучшение плоскостности подгибаемых полок и предотвращение кромковой волнистости при гибке профилей с продольными элементами жесткости типа гофр достигают за счет обжатия краевых элементов полосы в пределах упругости по ширине d , определяемой формулой [88]:

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

где B – ширина краевого элемента, мм; S – толщина материала заготовки, мм. Этот способ требует весьма высокой точности изготовления инструмента.

Швеллерные профили с переменной по длине шириной стенки (рис. 1.26), которые на практике встречаются редко, формуют роликами, установленными под определенными углами к вертикали [90].

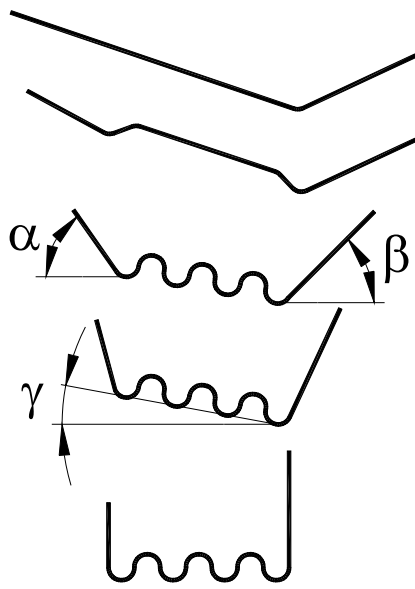


Рис. 1.25. Схема формообразования неравнополочного профиля с гофрами.

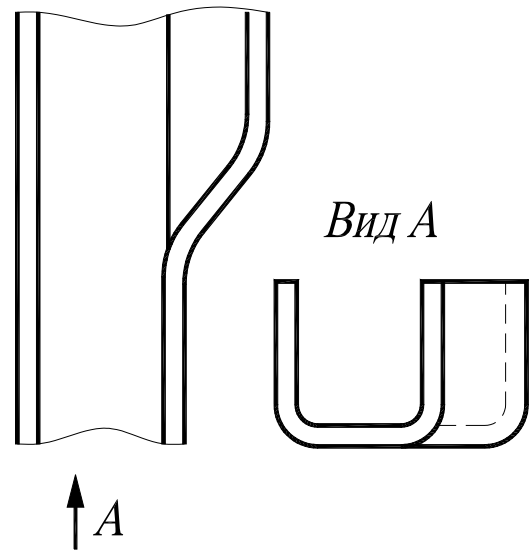


Рис. 1.26. Профиль с переменной шириной полки.

Профили швеллерного типа со ступенчатыми стенками (рис. 1.16д) формируют обычно при горизонтальном расположении дна профиля [91, 92]. Схема, приведенная на рис. 1.27, предназначена для предупреждения винтообразного скручивания профиля и реализуется в девяти переходах стана 1-4х50-300 при отсутствии кромковой волнистости [91]. Продольный прогиб не превышает 0,8 мм/м, а скрутка – 0,5 градуса. Профили с толщиной стенок менее 1 мм, изготавливаемые, например, за шесть переходов при встречной подгибке полок согласно данному способу, обычно подвержены кромковой волнистости при соотношении ширины прямой полки и ее толщины как 35 : 1, что хорошо известно из практики традиционного профилирования. Аналогичными недостатками обладает способ [92], в котором сочетается подгибка полок и перегиб элементов стенки (рис. 1.28). По этому способу изготовление профиля лотка размером 100х80х30х2 мм из стали Ст3 требует семи технологических переходов для предупреждения смятия кромок профиля.

Интересно отметить технологическое решение [93], по которому, с целью сокращения числа переходов, подгибку крайних элементов ведут на углы, приводящие к потере устойчивости этих элементов в продольном направлении, а последующую гибку проводят с обжатием по толщине. Такая схема формообразования применима для формовки профилей с элементами двойной толщины при толщине стенок 1 – 2 мм, когда на одном из предварительных переходов вызывается направленная потеря устойчивости в виде кромковой волнистости, а на одном из последних переходов производят ее спрямление с обжимом.

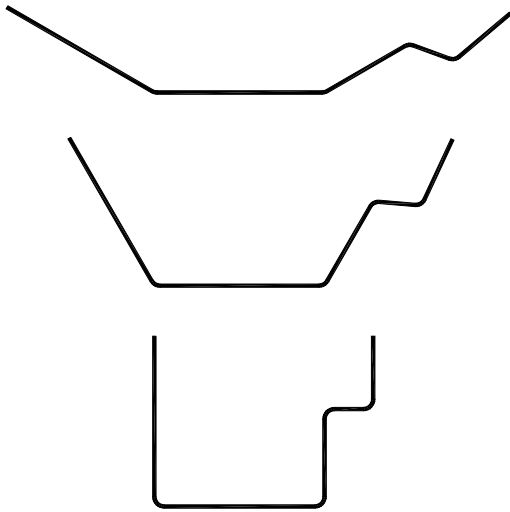


Рис. 1.27. Схема формообразования профиля со ступенчатой стенкой.

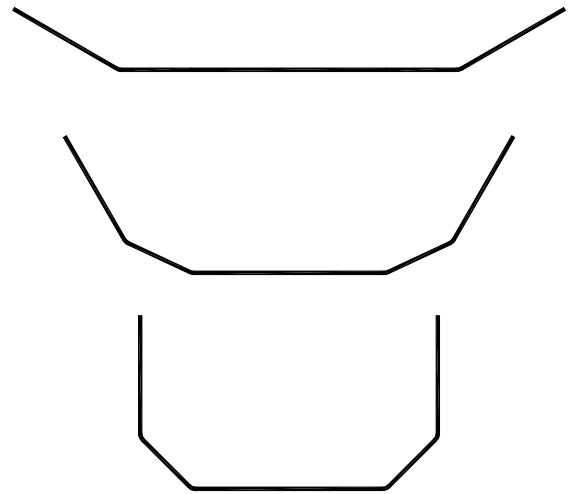


Рис. 1.28. Схема формообразования швеллера с многоэлементной стенкой.

1.4.3. Корытообразные профили

Производство корытообразных профилей сталкивается с проявлением ряда дефектов, среди которых наиболее серьезными являются продольный прогиб, кромковая волнистость, излом полков, а в случае изготовления несимметричных профилей – их скрутка. На рис. 1.29 приведено условное представление основных типов профилей корытного типа, формируемых по различным схемам. Профили небольших габаритов при ширине дна не более двух высот профиля, можно изготавливать методом стесненного изгиба [94, 60]. При широких горизонтальных полках возможно возникновение кромковой волнистости при изготовлении профиля за три – четыре перехода. На некоторых профилях с широкими боковыми полками может наблюдаться их неплоскостность до 0,4 – 0,7 мм.

При изготовлении симметричных профилей (рис. 1.29а) предотвращение кромковой волнистости и продольного изгиба достигается за счет равномерно-

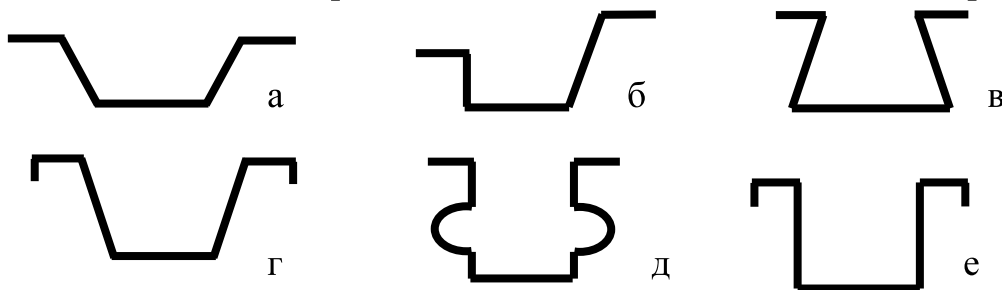


Рис. 1.29. Основные типы профилей корытного типа

го распределения деформаций заготовки по переходам [95] путем смещения кромок заготовки в вертикальной плоскости на расстояния, определяемые по формуле:

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

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

В способе производства гнутых профилей [96] с целью предотвращения утонения в местах изгиба профиль формуют на предварительных переходах до швеллерного профиля с завышенной шириной донной части, а затем отгибают горизонтальные полки с одновременным сжатием боковых полок до получения профилем окончательных размеров (рис. 1.30). Способ реализуется в 13 технологических переходах и позволяет уменьшить утонение с 13 – 15 % до 2,2 – 3,7 %, при этом продольный погиб не превышает 0,1 % (6 мм на 6 метров длины), а кромковая волнистость – 0,7 – 0,9 мм/м.

Способ изготовления гнутого корытного профиля [97] предусматривает приложение нормальных усилий к участкам вертикальных полок вблизи зоны сгиба после чистового перехода, а на предварительных переходах центруют заготовку горизонтальными усилиями с последующим обжатием дна профиля с целью улучшения его геометрии (рис. 1.31).

В способе изготовления гнутых профилей [98], с целью уменьшения числа переходов на 15 – 20 %, повышения качества поверхности и расширения сортамента, в последних переходах боковые элементы подгибают на $17 - 35^\circ$ по

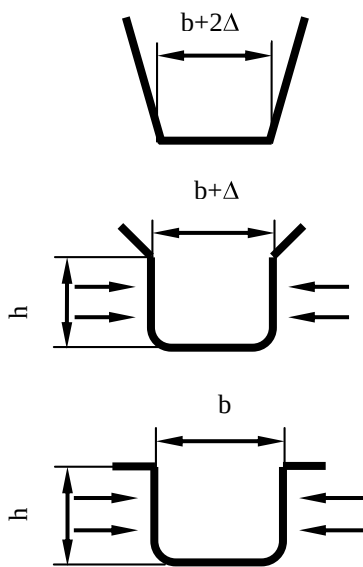


Рис. 1.30. Схема формования по способу работы [96]

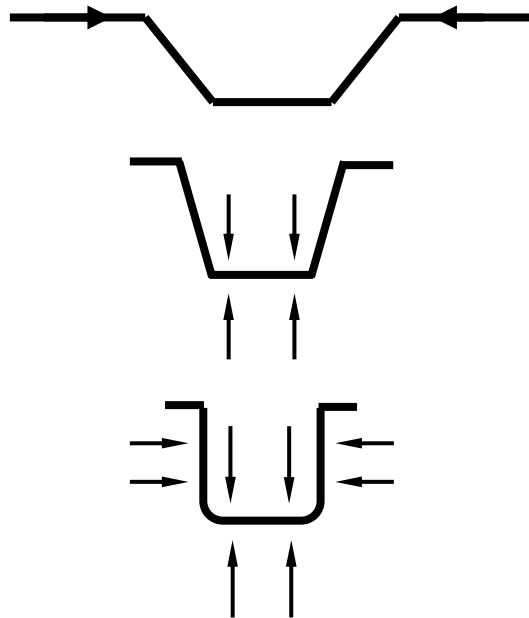


Рис. 1.31. Схема формования по способу работы [97]

отношению к стенке при суммарном угле подгибки $87 - 89^\circ$ (рис. 1.32). Способ реализуется на стане 1–6–50х500 за семь переходов. Способ применим для изготовления профилей с небольшими боковыми и горизонтальными полками.

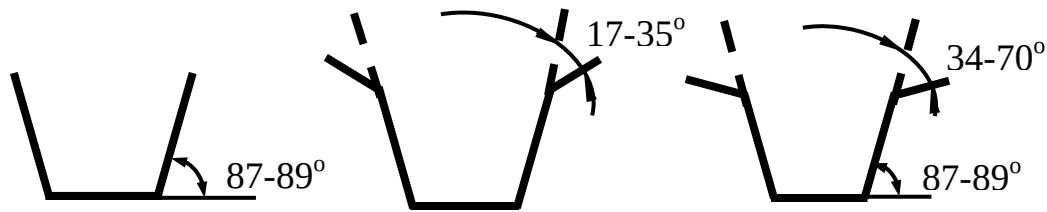


Рис. 1.32. Схема формообразования по способу [98]

Расширение технологических возможностей за счет приложения к торцам заготовки нормального усилия, а к центральной ее части – радиального усилия при высвобождении боковых элементов (рис. 1.33) достигается применением способа [99], предназначенного для изготовления корытных профилей толщиной 0,5...0,8 мм, преимущественно из материалов цветных сплавов.

Кромковая волнистость может появляться при изготовлении профилей с широкими полками вследствие приложения торцевых усилий к кромкам.

При изготовлении профилей с покрытием, предотвращение нарушений покрытия можно достичь за счет увеличения площади контакта заготовки и инструмента [100] с уменьшением ширины мест изгиба по переходам в соответствии с формулой:

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

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

При изготовлении профилей с выпуклым дном и высотой, превышающей ширину более чем в два раза, углы подгибки по переходам берут равными, горизонтальные полки оставляют во всех переходах на одном уровне, а выпуклую часть опускают в каждом из переходов [101].

Данная схема позволяет предотвратить кромковую волнистость за счет устранения перемещения периферийных элементов по вертикали и реализуется за шесть переходов. На рис. 1.34 приведена схема формообразования с условным сокращением числа переходов.

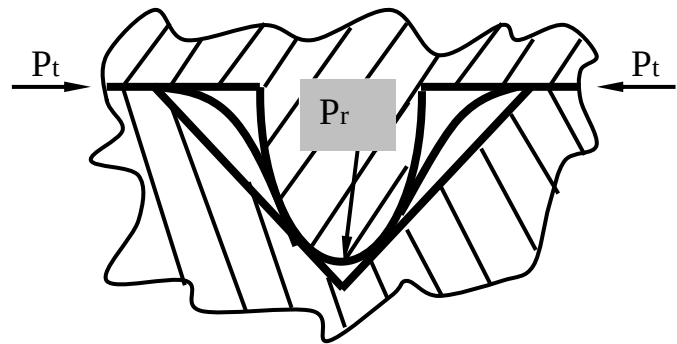


Рис. 1.33. Схема формообразования по способу [99]

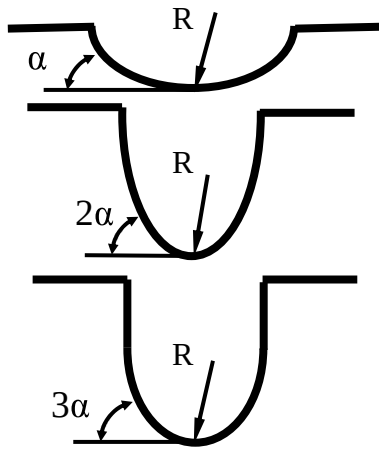


Рис. 1.34. Схема формообразования профиля по способу [101]

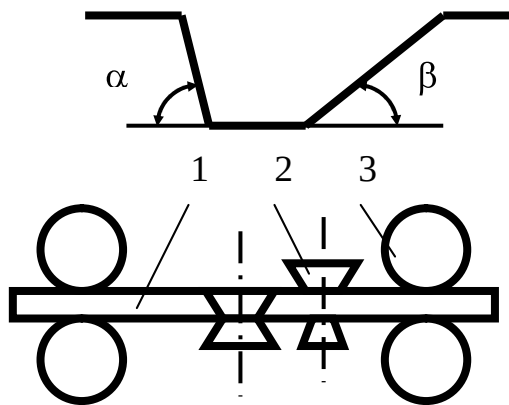


Рис. 1.35. Изготовление профиля по способу [102]: 1 – профиль; 2 – проводки; 3 – формирующие ролики

последнем переходе (рис. 1.36). Производство профилей с углами более 90° можно осуществлять путем скрутки в одном направлении с последующей скруткой в другом [105], однако при широких периферийных элементах из-за скрутки

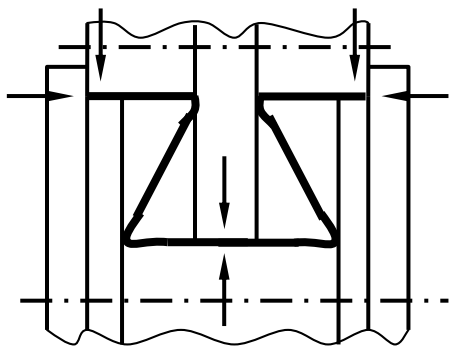


Рис. 1.36. Изготовление профиля по способу [104]

Производство несимметричных профилей (рис. 1.29б) связано с предотвращением скручивания, кромковой волнистости и продольного прогиба. В этом случае приходится назначать различные углы подгибки полок и применять межклетьевые проводки, обеспечивая равенство активных зон для обеих полок [102]. На рис. 1.35 приведено схемное решение этой технологической задачи. Одностороннее поджатие вертикальными роликами может приводить к серповидности профиля. Более целесообразно применение калибров [103], исключающих смещение в заготовки в горизонтальной плоскости.

Изготовление корытообразных профилей с углами подгибки более 90° (рис. 1.29в) требует применения специальных приемов для повышения качества профилей, расширения технологических возможностей и уменьшения трудозатрат. В способе [104] профиль с углами 103° изготавливается за восемь переходов с одновременным зажатием дна профиля и его горизонтальных полок в предварительных переходах, а в предпоследних двух переходах проводят догибку боковых полок на углы $9-10^\circ$ и $4-5^\circ$ соответственно торцевым поджатием кромок с высвобождением профиля от зажатия в последнем переходе (рис. 1.36). Производство профилей с углами более 90° можно осуществлять путем скрутки в одном направлении с последующей скруткой в другом [105], однако при широких периферийных элементах из-за скрутки

возможно появление кромковой волнистости. На рис. 1.37 показано положение профиля в переходах, отличающих данный способ от других, при использовании восьми технологических переходов.

Волнистость кромки часто появляется при изготовлении профилей корытообразного профиля с поднутрением в верхней части. Способ изготовления [106] предусматривает девять технологических переходов для производства тонкостенных профилей с шири-

ной дна от 44 до 244 мм. На первых переходах формуют V – образные отгибы с последующей подгибкой боковой стенки, а в двух последних переходах совме-

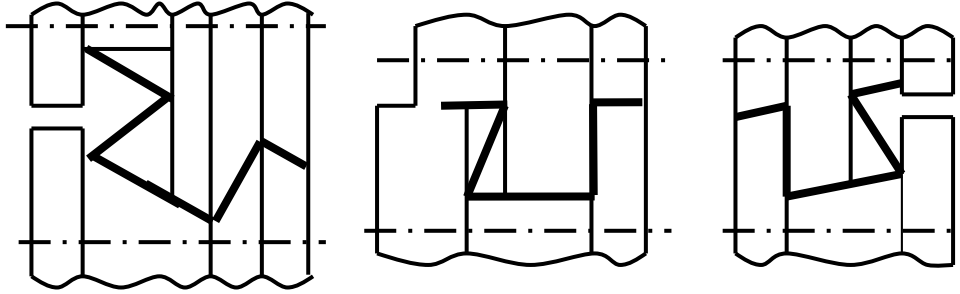


Рис. 1.37. Изготовление корытообразного профиля по способу [105]

щают дифференцированный обжим заготовки с удержанием мест изгиба и краевых участков (рис. 1.38). Способ пригоден для производства профилей с покрытием и позволяет по сравнению с прототипом уменьшить кромковую волнистость с 1,8 ... 2 мм/м до 0,3...0,5 мм/м, радиусгиба с 2,5...2,8 мм/м до 1,8...2,0 мм/м при сохранении покрытия.

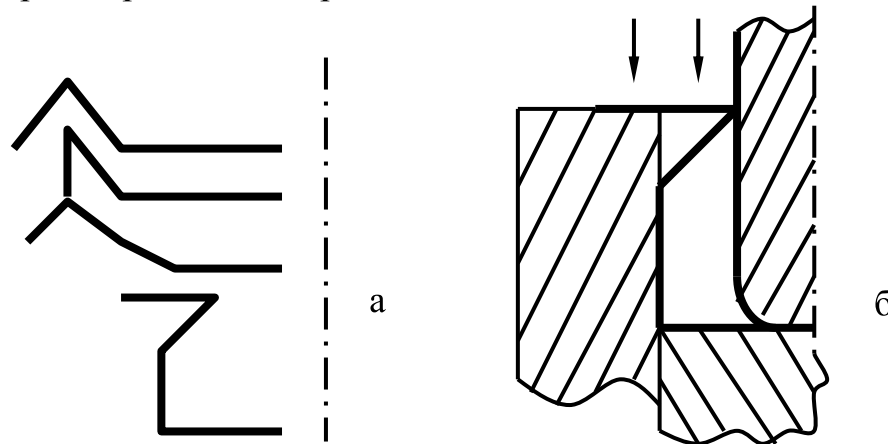


Рис. 1.38. Реализация способа [106]:
а – схема формовки; б – последний переход

В способе [107], предусматривающем восемь переходов, повышение точности сечения достигается подгибкой по переходам горизонтальных полок на $7 - 10^0$ и отбортовок до выведения их кромок на высоту, соответствующую их положению в готовом профиле, а затем отгибают полки до горизонтального положения при сохранении

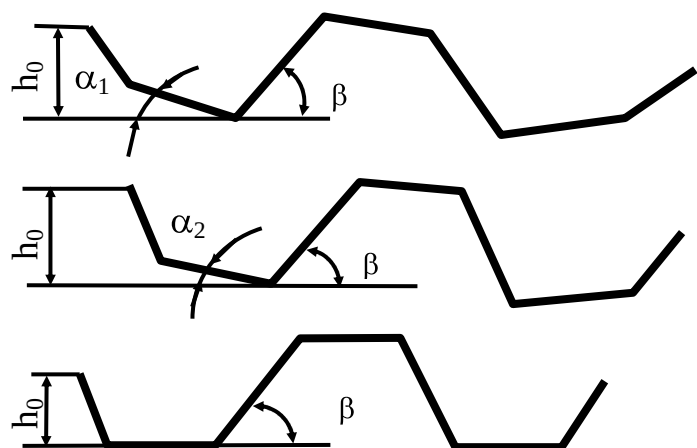


Рис. 1.39. Схема формообразования по способу [107]

неизменным положения по высоте кромок отбортовок (рис. 1.39). При большой ширине горизонтальных полок деформирование заготовки к форме корытного профиля может вызывать кромковую волнистость, а потому целесообразнее совмещать формообразование центральной части профиля с выполнением отбортовок для уменьшения числа переходов. Аналогичный подход можно предложить для совершенствования схемы формообразования профиля с отбортовка-

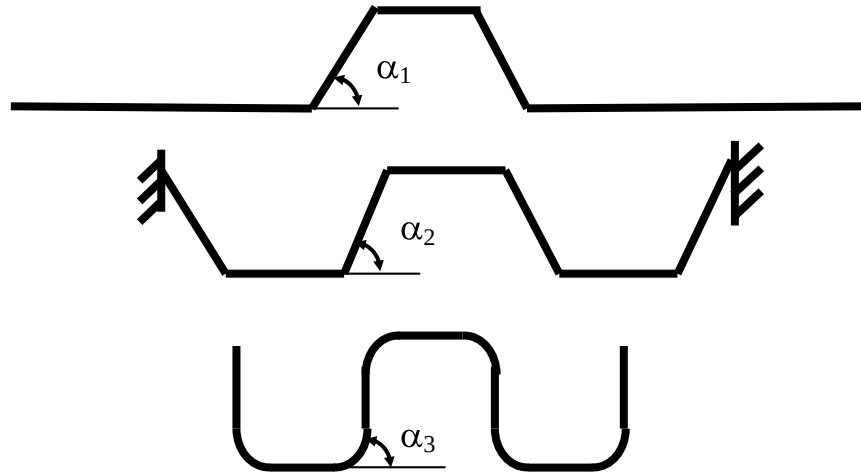


Рис. 1.40. Реализация способа [108]

ми (рис. 1.29г), размер которых соизмерим с высотой профиля (рис. 1.40) [108].

При изготовлении корытных профилей с глубокими гофрами наружу на подгибаемых полках (рис. 1.29д), с целью обеспечения плоскостности отбортовок и прилегающих к ним полок, усилия со стороны внутренней поверхности отбортовок прикладывают по касательной к этой поверхности, а к прилегающим полкам – по нормальям к наружной поверхности (рис. 1.41) [109].

Корытообразный профиль с бульбообразным утолщением (рис. 1.29е) у отбортовок можно изготавливать по прямой или обратной схеме (рис. 1.42) методом стесненного изгиба [110]. В этом случае возможен излом полки при относительно широком дне профиля и узких горизонтальных полках, когда осадка заготовки приводит к существенному различию продольных деформаций и, следовательно, продольный кривизне профиля, подлежащей устранению правильным устройством.

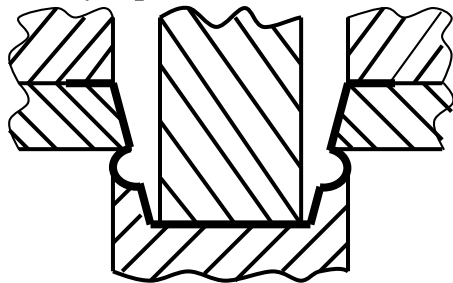


Рис. 1.41. Расположение профиля в калибре по способу [109]

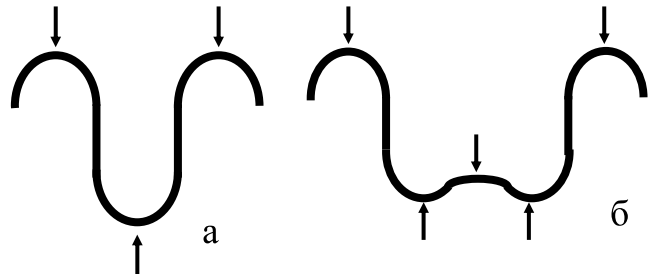


Рис. 1.42. Схема формообразования профиля с бульбообразным утолщением: а – прямая схема; б – обратная схема.

В способе [111] к заготовке прикладывают аксиальные растягивающие усилия до достижения продольной деформации 2...4%. Предотвращению потери устойчивости периферийных элементов может способствовать обжатие донной части профиля в пределах упругости с целью выравнивания деформаций по сечению профиля.

1.4.4. С – образные профили

При формообразовании С-образных профилей (рис 1.43) подверженность периферийных элементов потере устойчивости существенно выше, чем при изготовлении корытообразных профилей. Это связано с относительно свободным положением краевого элемента в калибрах из-за отсутствия доступа инструмента в «мертвую зону» формообразования.

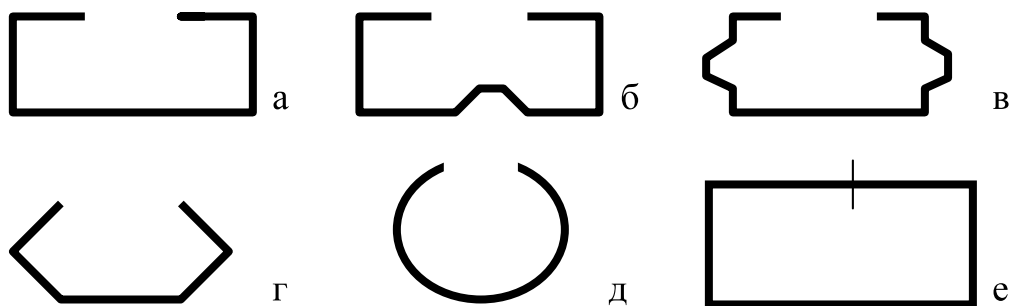


Рис. 1.43. Основные типы С – образных профилей

Обобщенная конфигурация открытого С – образного профиля представлена на рис. 1.43а. Повышение точности сечения симметричного С – образного профиля из оцинкованной стали толщиной 0,5 – 1,0 мм в способе [112] достигают путем выдерживания заданного расстояния между центрами кривизны зон сгиба с радиусами R_1 и R_2 (рис 1.44) за счет перехода материала в зону изгиба с краевых и средних участков. Переформовка угловой зоны с радиусом R_2 вызывает дополнительную продольную деформацию, что может приводить к излому кромки при широком дне профиля. Кроме того, переформовка требует дополнительных энергетических затрат и создает значительные контактные напряжения, являющиеся препятствием при изготовлении профилей с покрытием.

Уменьшение числа переходов при формообразовании профиля в способе [113] достигают за счет подгибки смыкающихся полок на угол 24...33° относительно боковых полок, при этом радиусыгиба во всех переходах делают одинаковыми и равными 1,0...1,33 толщины, а углы перегиба боковых и горизонтальных полок берут равными 2...3° и 1,5...2° соответственно (рис. 1.45).

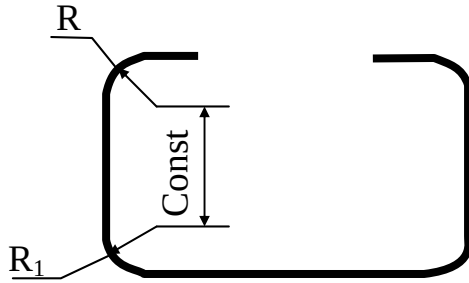


Рис. 1.44. Схема формования по способу [112]

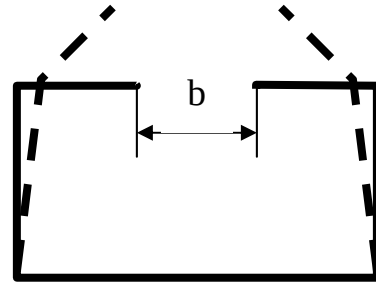


Рис. 1.45. Схема формования по способу [113]

Повышение точности С – образного профиля из Ст3 размером 80x40x15x2,5 мм при формовании его за шесть переходов достигают первоначально за счет перегиба [114] полков до достижения расстояния между кромками, равного заданному на готовом профиле, а затем осуществляют разгибку боковых стенок, воздействуя на них через места сопряжения их с полками (рис. 1.46). При широких горизонтальных полках способ приводит к появлению кромковой волнистости, не подлежащей исправлению, а потому реализация способа требует обычно от 7 до 10 переходов.

На рис 1.47 представлена реализация способа производства С-образных профилей с гофром жесткости в донной части (см. также рис. 1.43б), согласно которому, на предварительных переходах осуществляют подгибку будущих горизонтальных полков и формовку рифта одновременно, на последующих – подгибку боковых стенок с перегибом до 1° , а на последнем переходе зажимают вершину гофра валками [115]. Способ реализуется за 13 переходов. Наличие рифтов в донной части профиля не позволяет задавать большие углы подгибки за переход и в случае изготовления профилей большой высоты при жестких режимах подгибки возникает значительный продольный прогиб и излом или волнистость горизонтальных полков. На профилях толщиной до 0,8 мм у основания рифта могут появляться мелкие гофры под углом около 45° к направлению профилирования или темные полосы, предвещающие потерю устойчивости, напоминающие линии Чернова – Людерса.

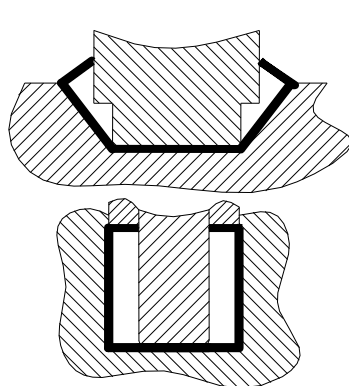


Рис. 1.46. Схема формования по способу [114]

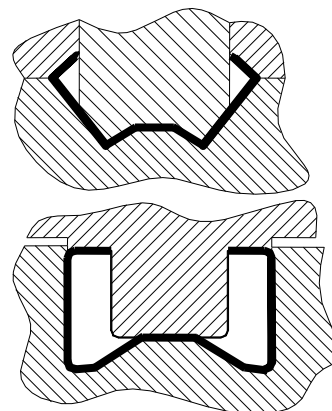


Рис. 1.47. Реализация процесса по способу [115]

При наличии нескольких продольных рифтов их можно формировать одновременно с утонением стенки или последовательно (рис. 1.48), как в способе изготовления гнутых С – образных профилей [116], где с целью уменьшения пружинения на предварительных переходах периферийные участки стенки отгибают на угол φ с одновременной подгибкой боковых стенок и полок, причем угол φ определяют из неравенства:

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

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

Одновременная формовка рифтов и подгибка боковой стенки и полки толщиной до 1 мм с применением межклетевых проводок для удержания боковых стенок от потери устойчивости позволяет уменьшить число переходов до шести, если высота профиля не превышает 50 мм, а ширина полки – 15 мм. Данный способ прошел технологическую апробацию и показал высокую эффективность.

В способе изготовления гнутых профилей [117] стабилизация расстояния между полками достигается за счет формовки на стенке технологического гофра с одновременной фиксацией кромок полок, последующей отгибки боковых стенок профиля и выпрямления технологического гофра с обеспечением подгибки боковых стенок на заданный угол (рис. 1.49). Способ реализуется в 11 клетях, однако при интенсивном формообразовании может быть осуществлен в шести переходах с применением технологического гофра и межклетевых проводок при толщине материала заготовки от 0,8 до 1,5 мм.

Производство профилей с гофрами жесткости на подгибаемых полках (рис. 1.43в) существенно усложняет технологию и технологическое оснащение в сравнении с производством профилей с гладкими элементами. При этом требуется от 8 до 14 переходов [118, 119].

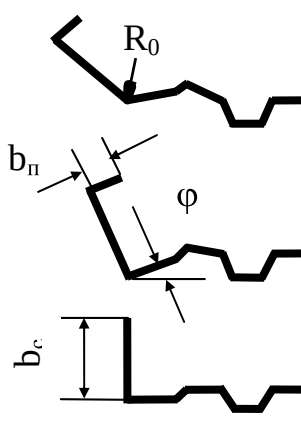


Рис. 1.48. Схема формообразования по способу [116]

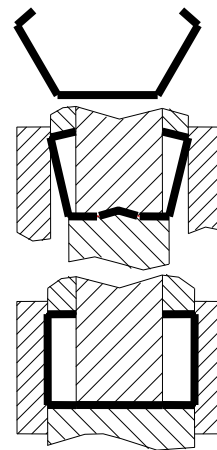


Рис. 1.49. претворение в жизнь способа [117]

Изготовление С – образных профилей открытого типа с наклонными полками (рис. 1.43-г) в известных способах требует 8 – 10 переходов. Например, в способе изготовления гнутых тонкостенных профилей [120] при производстве профиля 8х11,5х0,7 мм из оцинкованной стали 08пс с полимерным покрытием на стане 0,5 – 2х20 – 300 со скоростью 20 м/мин используют восемь переходов. В этом случае формообразования предусматривают предварительную подгибку краевых участков на 90°, последующую подгибку полок и разгибку краевых элементов, а в последнем переходе – осадку полок с удержанием кромок (рис. 1.50). Данная схема при осадке может приводить к потере устойчивости полок и нарушениям покрытия на торцах и местах изгиба между стенками и полками при сравнительно большой относительной ширине полки.

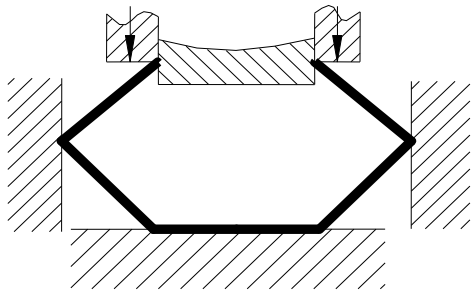


Рис. 1.50. Схема подсадки профиля в способе [120]

С – образные профили кругового типа (рис. 1.43д) изготавливают последовательной подгибкой криволинейных участков заготовки (свертыванием). Однако профили небольших сечений толщиной 1 – 2 мм можно изготавливать стесненным изгибом [21] за минимальное число переходов (от четырех до шести). При интенсификации производства таких профилей редко возникает потеря устойчивости краевых участков профиля, в то время как с увеличением

радиуса кривизны трубчатого профиля и уменьшением толщины стенки такие проблемы возникают. Решение их предполагает надлежащий выбор калибров по переходам или применение межклетьевых проводок. При изготовлении толстостенных С – образных профилей с целью уменьшения пружинения [121] иногда применяют схемы (рис 1.51) с боковым обжатием и осадкой.

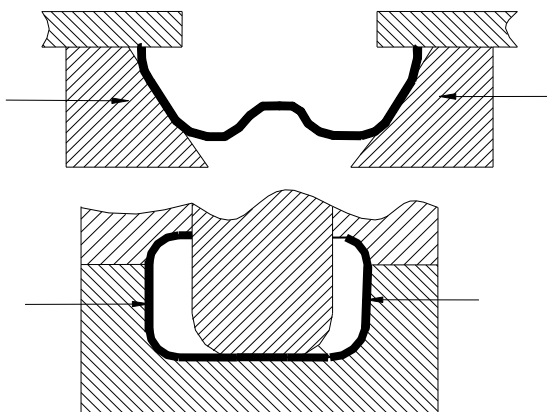


Рис. 1.51. Схема формообразования С – образного профиля: а – специальный профиль; б – открытая труба

В последние годы возросли потребности в замкнутых С – образных профилях (рис. 1.43е) различных отраслей национальной экономики, в первую очередь строительной индустрии и предприятий – производителей мебели.

Характерным элементом технологии производства замкнутых профилей, реализуемой обычно за 8 – 18 переходов является сжатие профиля в валках на последних переходах [122 – 125]. В каждом случае применяют специальные приемы для устранения депланации стенок и кромок из-за различной жесткости элементов

профиля. Например, в способе изготовления профилей коробчатого сечения [126] предотвращение потери устойчивости и искажения формы стенок достигается за счет одновременного или последовательного прогиба элементов

профиля на такую величину, что деформация прогиба не превышает величины максимальной упругой деформации для данного материала заготовки. Для изготовления профилей с толщиной стенок менее 1 мм с целью интенсификации процесса целесообразно применение внутренних оправок, а при необходимости – дополнительных вертикальных клетей или межклетевых проводок.

1.4.5. Другие виды профилей

Схемы формообразования Z – образных и специальных профилей также должны учитывать возможность появления кромковой волнистости, однако для их реализации возможны заимствования из схем формообразования уже описанных типов профилей, а потому здесь они специально не обсуждаются. Это, конечно, не означает, что здесь все проблемы получили свое решение. Речь идет лишь о простейших конфигурациях профилей этих типов небольших размеров поперечного сечения, где кромковая волнистость – явление не частое.

1.5. Учет факторов процесса профилирования при теоретическом анализе

Теоретическому анализу процессов гибки, лежащим в основе профилирования, посвящено значительное количество работ известных ученых И. П. Ренне [127], Е. А. Попова [128], В. И. Давыдова [129], Р. Хилла [130], Г. Я. Гуна [131], В. В. Соколовского [132], В. В. Колмогорова [133], К. Н. Богоявленского [72], Ю. М. Арышенского [134], В. И. Ершова [36, 135], А. Д. Матвеева [136], М. Е. Докторов и И. С. Тришевского [58], Г. В. Проскурякова [15, 54], С. И. Вдовина [34, 35], Х. Судзуки и М. Киути [137], Д. Кокадо и Е. Онода [138] и др.

Процесс стесненного изгиба в угловой зоне рассмотрен в ряде работ [15, 134, 135, 58, 63, 4, 139], где выявлено влияние на параметры изготавливаемых профилей различных факторов: упрочнения, анизотропии, толщины, угла и радиусагиба, а также силовых параметров процесса. Однако в последние годы в связи с изменением номенклатуры профилей, изготавливаемых профилированием в роликах, наметился отход от схем стесненного изгиба, связанного с осадкой волнообразной заготовки, в пользу метода интенсивного деформирования, сохранившего от стесненного изгиба некоторые особенности (см. табл. 1.6) [61, 65, 66]. Указанная тенденция обусловлена, в основном, тем, что значительная ширина профиля часто позволяет применение только обратных схем формообразования, обладающих рядом недостатков и описанных в предыдущих разделах, а также применением материалов с покрытием, чувствительных к значительным перегибам и большим контактными усилиям [56].

1.5.1. Межклетьевое расстояние

При интенсивном деформировании, как, впрочем, и при традиционном профилировании большое значение для продольных деформаций полок имеет межклетьевое расстояние, которое обычно задано конструкцией профилеги-

бочной машины [62, 140]. 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 [141].

Определение протяженности зоны плавного перехода важно как для разработки технологии, так и для проектирования профилегибочного оборудования [141, 142]. В работе [142] представлены данные экспериментов по определению протяженности зоны плавного перехода (рис.1.52), осуществленных на десятиклетьевом консольном стане при варьировании факторов, сведенных в табл. 1.7.

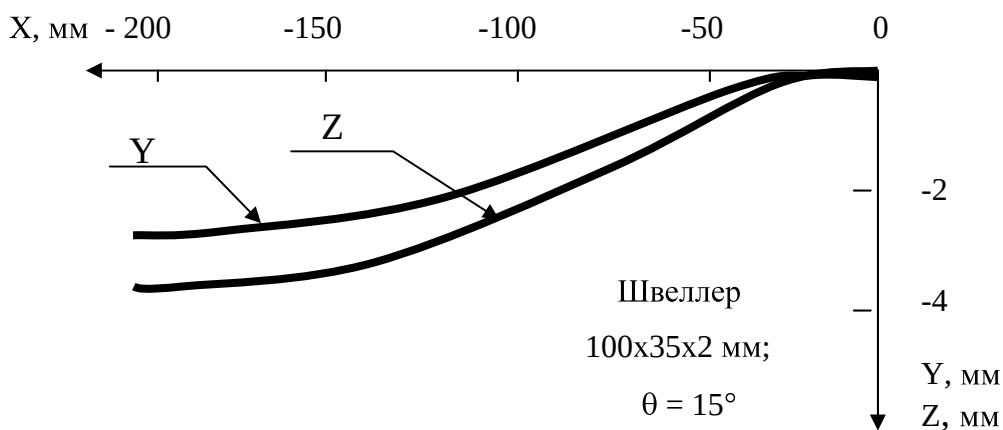


Рис. 1.52. Положение кромки при профилировании

Проведенные эксперименты с точностью $\pm 6\%$ показали, что деформация полки и протяженность зоны плавного перехода зависят от угла подгибки, ширины полки и толщины материала и практически не зависят от механических свойств материала. Отметим, что исследование охватывало только номенклатуру швеллеров с полками, не превышающими 35 толщин материала. Кроме того, не было учтено влияние радиусов зон сгиба, которое при некоторых условиях может оказываться значительным.

Таблица 1.7.

Условия и варьируемые факторы эксперимента в работе [142]

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

В публикации [143] на основе экспериментальных данных по результатам формообразования швеллерного равнополочного профиля 100x35x2 мм с помощью кривых Безье описана конфигурация зоны плавного перехода полки,

подгибаемой по режимам: $15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ$ (рис. 1.53) и $30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ$. Интересно отметить, что при режиме подгибки в 15° продольная логарифмическая деформация не превышает 0,18 %, в то время как при увеличении угла подгибки до 30° на первом переходе та же деформация достигает величины 0,54 % (рис.1.53). К сожалению, приведенные данные не охватывают диапазон изменения толщин и ширин полок, а потому носят весьма частный характер.

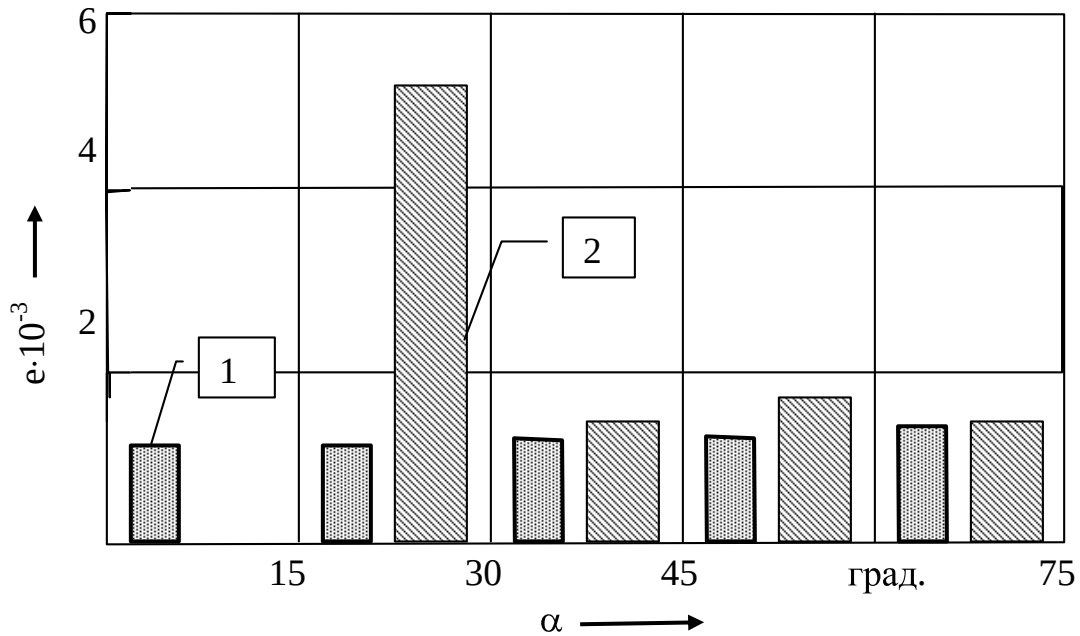


Рис. 1.53. Зависимость продольной логарифмической деформации полки от режимов ее подгибки: 1 – со всеми переходами; 2 – без первого перехода

В работе [129] при определении продольных деформаций полки считают, что протяженность зоны плавного перехода и межклетьевого расстояния совпадают. Однако при углах подгибки более 10° данное предположение вносит существенную погрешность в расчеты.

В книге [58] приведены результаты исследований протяженности зоны плавного перехода, которые показывают, что ее отличие от межклетьевого расстояния значительно. Установлено также, что очаг пластической деформации простирается за осевую плоскость валков на небольшое расстояние (порядка $1/3$ от среднего диаметра формирующих роликов). Указано, что поперечный изгиб полки увеличивает протяженность зоны плавного перехода.

Определение протяженности зоны плавного перехода вариационным методом при формообразовании уголкового профиля из материала, упрочняющегося по степенному закону, рассмотрено в работе [131]. Протяженность зоны плавного перехода L_g дается формулой:

$$L_g = 2 \cdot b \cdot (m + 1) \cdot \left[\frac{m + 2}{2 \cdot m + 3} \cdot \frac{b}{s_0} \cdot \left(\frac{r}{s_0} \right)^m \right]^{\frac{1}{2 \cdot m + 2}} \cdot \left(\frac{\Delta \varphi}{2 \cdot m + 1} \right)^{\frac{2 \cdot m + 1}{2 \cdot m + 2}}, \quad (1.1)$$

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

1.5.2. Угловая зона

Исследованию угловой зоны при обычной гибке посвящены работы [127, 128, 130], в которых определено напряженно-деформированное состояние в зонах растяжения и сжатия при пластическом и упруго – пластическом изгибе. В книгах [36, 134, 135] установлены зависимости внешних силовых факторов и внутреннего состояния при стесненном изгибе с применением вариационных методов. В статье [139] установлено влияние касательных напряжений при стесненном изгибе на формирование угловой зоны. В монографии [132] исследован изгиб с растяжением; полученные результаты могут быть использованы при разработке совмещенных схем формообразования профилей. При интенсивном деформировании тангенциальные силы сжатия заготовки невелики, однако их влияние может иметь определенное значение при изготовлении профилей из материалов с покрытием [56, 65]. Имеется большое количество работ, в которых рассматриваются вопросы учета упрочнения, анизотропных свойств материала, вопросы пружинения, предельных возможностей [1, 19, 34, 41, 48, 54, 57, 58, 60] 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.

1.5.3. Кромковая волнистость

С проблемами кромковой волнистости при профилировании разработчики технологии столкнулись давно [144], однако особую остроту эти проблемы приобрели лишь в последние годы в связи с расширением номенклатуры тонкостенных широкополочных профилей. Кромковая волнистость возникает как при обычном профилировании, так и при стесненном изгибе [138]. В указанной работе [138] экспериментально изучен вопрос возникновения кромковой волнистости при изготовлении желобчатых профилей с фланцами из заготовок шириной от 94 до 200 мм и толщиной от 0,4 до 2,0 мм при изменении вертикального и бокового углов захода профиля в роликовых калибр. Установлена зависимость продольной остаточной деформации полки от степени «стеснения» профиля (отношения ширины заготовки B_z к ширине профиля B) (рис. 1.54) при отношении высоты профиля к ширине проема калибра $H/L = 0,2$ и угле захода = 6° , а также ряд других характерных зависимостей. К сожалению, в указанной работе не предпринята попытка обобщения результатов исследований на другие типоразмеры профилей и выработки общего критерия возникновения кромковой волнистости.

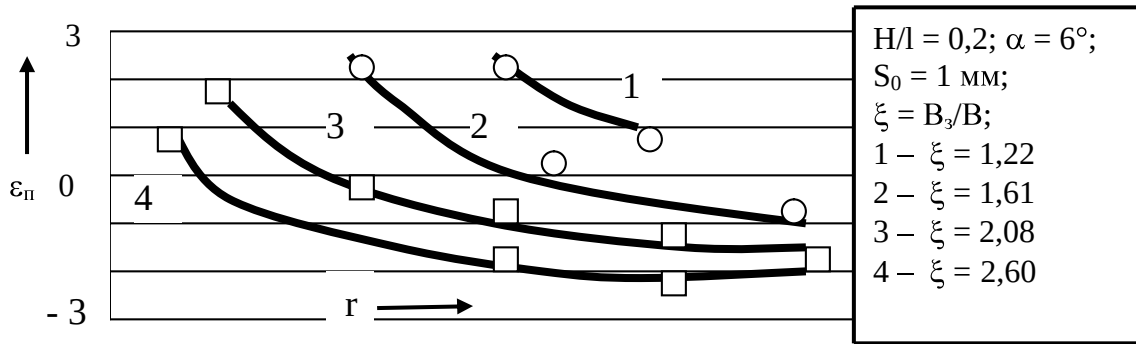


Рис. 1.54. Распределение продольной деформации по ширине фланца: $\square$ - кромковая волнистость возникает; $\circ$ - кромковая волнистость не возникает

В аналогичной работе [137] исследовано влияние ширины заготовки и зазора в роликовом калибре на форму зоны, прилегающей к кромке, а также продольный изгиб заготовки. Приведенные экспериментальные данные не связаны аналитическими зависимостями и не систематизированы.

Обзорная статья М. Киути [145] затрагивает как вопросы оптимизации технологии, так и проблемы конструкции оборудования и систем контроля при профилировании. Следует отметить указание автора на возможность появления на поверхности профиля линий Чернова – Людерса, которые действительно возникают при формообразовании профилей с элементами жесткости из оцинкованной стали при жесткой схеме формообразования (несколько таких случаев имели место при отработке технологии в ФГУП «Ульяновский НИАТ»).

1.5.4. Число переходов

В работе [145] обсуждаются также вопросы важности определения минимального числа переходов при профилировании. Этот вопрос решается обычно на основании предшествующего опыта разработчиков и зачастую указывается лишь достаточно широкий диапазон значений числа переходов для профилей определенного типа. Это существенно осложняет формализацию процесса проектирования технологической оснастки для формообразования профиля в роликах. Так, в работе [146] указывается, что для изготовления угловых профилей требуется 3 – 5 пар роликов, для швеллерных профилей – 4 – 7 пар роликов, для корытообразных и С – образных – 6 – 10, для труб и других закрытых профилей – 8 – 12 пар роликов без указания условий осуществления процесса формообразования профилей.

Несколько иной подход к определению числа переходов дан в работе [147], где на основе опыта проектирования и внедрения процессов профилирования фирмой «Хитачи киндзоку» сформулирован фактор формы профиля Φ в виде:

$$\Phi = \begin{cases} \frac{b^\Sigma \cdot n \cdot s_0, \text{ узкий профиль}}{B_3 \cdot h \cdot n / W}, & \text{широкий профиль} \end{cases}, \quad (1.2)$$

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

На основе накопленного опыта построена зависимость потребного числа переходов от значения фактора формы, определяемого по формуле (1.2). Однако предложенный подход, с нашей точки зрения, обладает рядом недостатков, которые выявились при попытке обобщения опыта проектирования и внедрения более 500 типоразмеров профилей с помощью приведенного фактора формы и соответствующих ему графических зависимостей для определения числа переходов. Расхождение данных составляло от двух до пяти переходов, что объясняется, по-видимому, различными схемами формообразования, другими характеристиками оборудования и технологической оснастки.

Выводы

Хорошая весовая отдача, высокое качество и сравнительно невысокая стоимость гнутых профилей предопределяют их широкое применение в авиастроении, автомобилестроении и особенно в строительной индустрии. В последние годы растет спрос на широкополочные тонкостенные профили различного поперечного сечения.

Интенсивное деформирование гнутых профилей в роликах предпочтительнее методов гибки в кромкогибочных устройствах, штампах, инструментальных фильерах, в роликах при традиционном профилировании и др. как с точки зрения экономической, так и с точки зрения обеспечения надлежащего качества профилей, в частности, их периферийных элементов.

При формообразовании широкополочных тонкостенных профилей в роликах из возникающих дефектов наиболее серьезными являются дефекты, связанные с потерей устойчивости элементов профиля, в частности, кромковая волнистость, излом полки, хлопуны и мелкие гофры. Наибольшие проблемы с точки зрения возникновения указанных дефектов вызывают профили швеллерного, корытного и С – образного типов.

Для оптимизации схем формообразования и повышения качества профиля большое значение имеет решение вопросов, связанных с определением протяженности зоны плавного перехода, напряженно – деформированного состояния профиля в контактной и свободной зонах, влиянием на качество профиля углов подгибки и захода профиля в роликовый калибр, а также определение условий потери устойчивости периферийных элементов профиля и повышения его размерной точности при обоснованном и априорно задаваемом числе переходов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ В РОЛИКАХ ПРОФИЛЕГИБОЧНОГО СТАНКА

Из основных неустраняемых правкой дефектов профилей – излом полки, линии Чернова – Людерса, хлопуны и кромковая волнистость – последняя является наиболее серьезным и часто повторяющимся (в 85 – 90 % случаев) дефектом при отработке технологии формообразования профиля в роликах.

Зависимость появления этого дефекта от параметров оборудования, числа переходов, конфигурации калибров роликов и настроечных параметров технологического процесса предполагает построение математических моделей с целью оптимизации процесса профилирования и совершенствования профилегибочного оборудования.

2.1. Классификатор способов предотвращения кромковой волнистости

Потеря устойчивости периферийных элементов профиля является главным ограничением технологических возможностей метода интенсивного деформирования. Наибольшую склонность к потере устойчивости в виде кромковой волнистости имеют швеллерные профили, жесткость подгибаемых полок которых сравнительно мала.

На рис. 2.1 приведен классификатор способов предотвращения кромковой волнистости [148], направленных на уменьшение продольных деформаций подгибаемых элементов или выравнивание продольной деформации по сечению профиля. Ряд способов может быть применен только при определенных условиях. Например, схемы 1.1, 1.2, 1.3 и отчасти 1.5 могут быть реализованы, как правило, при переходе к очередному поколению станов при доработке их конструкции. Однако целесообразность такого подхода определяется номенклатурой профильной продукции, подлежащей изготовлению на данном оборудовании, и экономическими показателями его эксплуатации. Увеличение числа клеток, межклетьевого и межосевого расстояний ведет к увеличению объемов технологического оснащения, габаритов оборудования [141, 138], и, следовательно, к увеличению капитальных затрат. Мероприятия по модернизации оборудования экономически оправданы, как правило, лишь в серийном производстве типовых профилей. Схема 1.4 может быть реализована установкой дополнительной клетки для предотвращения «развала» и «схлопывания» профиля небольших габаритов (порядка 20х20 мм). Что касается скоростного режима профилирования (схема 1.5) при мелкосерийном производстве, то, как показывает производственный опыт, загрузка оборудования на предприятиях составляет 1 – 1,5 смены при скорости профилирования от 6 до 20 метров в минуту. Скорости профилирования до 20 м/мин допускают углы подгибки на первых перехо-

дах до 25? – 30? за переход, что позволяет существенно интенсифицировать технологический процесс профилирования.

Конфигурации переходов (рис. 2.1, схема 2.1) можно оптимизировать за счет участков высвобождения в калибре и различных видов его замыканий. Однако при наличии участков высвобождения и отклонениях зазора по ширине калибра возникают дополнительные деформации (при обжати) или поперечное фланирование заготовки (при превышении номинального зазора калибра).



Рис. 2.1. Классификатор способов предотвращения кромковой волнистости

В том и другом случае возрастает вероятность появления кромковой волнистости, в связи с чем на практике применяют закрытые калибры с номиналь-

ным зазором, что исключает необходимость рассмотрения схем дифференцированного обжима заготовки.

Применение элементов жесткости (рис. 2.1, схема 2.4) в форме устранимых или неустраняемых рифтов, вводимых при проработке профиля на технологичность, может давать хорошие результаты по предотвращению кромковой волнистости [66]. Последнее в обязательном порядке подлежит согласованию с заказчиком, поскольку введение элементов жесткости может входить в противоречие с функциональным назначением профиля, требованиями сборки, внешнего вида и т.п. Использование элементов жесткости несколько уменьшает происходящие на каждом из переходов деформации за счет повышения уровня сжимающих напряжений донной части профиля, причем, в ряде случаев не происходит увеличения расхода материала ввиду локальной деформации материала (вытяжка).

Использование заготовок волнообразной формы (рис. 2.1, схема 2.5) с целью предотвращения кромковой волнистости возможно лишь для профилей корытного типа и мелкосортных швеллеров с небольшой шириной донной части. В этом случае за счет осадки донной части профиля возможно достижение примерно одинаковых деформаций кромки и донной части, однако уровень остаточных напряжений может приближаться к пределу текучести материала, что существенно ухудшает эксплуатационные характеристики профиля.

Схемы 3 и 4 (рис. 2.1) используются для изменения формы линии профилирования (углов захода и выхода профиля) и рассматриваются в разделе 2.5.

2.2. Основные допущения при теоретическом рассмотрении процесса

Теоретические исследования охватывают вопросы протяженности и конфигурации зоны плавного перехода, поведения заготовки в контактной зоне, оптимальности углов подгибки, влияния углов захода на деформационные характеристики подгибаемых полок и условий потери их устойчивости, а также потребного числа переходов. При рассмотрении этих вопросов приняты следующие допущения:

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

- при определении *оптимальных углов подгибки* считаем, что напряжение по толщине полки незначительно; продольные деформации имеют линейный

закон распределения; показатели схем напряженного и деформированного состояния совпадают;

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

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

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

2.3. Определение протяженности зоны плавного перехода в межклетьевом пространстве

Протяженность зоны плавного перехода связана с деформационными характеристиками подгибаемых полок и зависит как от геометрических параметров изготавливаемого профиля, режимов подгибки, так и от характеристик применяемого оборудования [58, 131, 141, 146]. Влияние двух последних на показатели процесса формообразования представлено в табл. 2.1 [141].

Таблица 2.1.

Влияние характеристик оборудования и режимов подгибки
на параметры процесса

Недостатки	Следствия
Заниженное значение межклетьевого расстояния (оборудование)	Кромковая волнистость, продольный прогиб, разрыв заготовки, переформовка заготовки, увеличенное энергопотребление оборудованием
Завышенное значение межклетьевого расстояния (оборудование)	Необоснованное увеличение габаритов и металлоемкости оборудования, необходимость дополнительных проводов, увеличенные энергозатраты
Заниженный угол подъема кромки (технология)	Увеличение числа переходов и количества оснастки, усложнение отладки и настройки оборудования
Завышенный угол подъема кромки (технология)	Кромковая волнистость, значительная продольная кривизна профиля, разрыв заготовки

Как показывает табл. 2.1, для оптимизации процесса формообразования профиля необходимо разработать модель подгибки полки профиля в межклеть-

ево́м пространстве и сформулировать соответствующие требования к ведению процесса формообразования и межклетьевому расстоянию профилегбочного станка.

Рассмотрим общий случай формообразования профиля, когда на заготовку, кроме силы подгибки со стороны роликов текущего перехода, еще действуют усилия торцевого поджатия P_t и аксиальные усилия (сжатия или растяжения) (рис. 2.2). При этом считаем, что перегиб полки перед входом в роликовый калибр не оказывает существенного влияния на механические характеристики заготовки (пренебрежение эффектом Баушингера). Указанные силовые факторы обеспечиваются выбором соответствующей конфигурации роликов, соотношением их диаметров, зазоров в них и шириной заготовки при заданном межклетьевом расстоянии L_m .

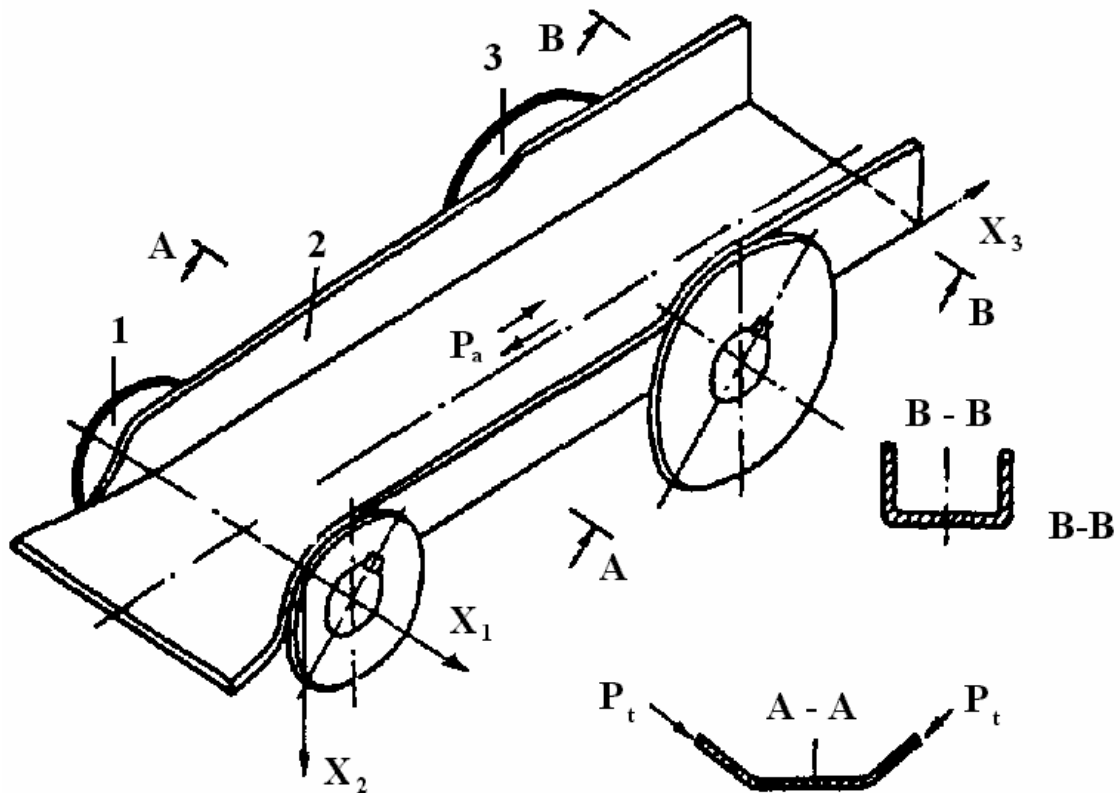


Рис. 2.2. Реализация процесса и силовые факторы при профилировании: 1 - роликовая пара предварительной подгибки; 2 - зона плавного перехода; 3 - роликовая пара окончательного формообразования

Примем следующую последовательность решения поставленной задачи:

- найдем энергию деформирования заготовки и составим функционал энергии;
- произведем минимизацию функционала энергии;
- с учетом исходных допущений определим протяженность зоны плавного перехода.

Пусть в поперечном сечении заготовки механические свойства ее в направлениях x_1 и x_2 одинаковы, но отличны от тех же свойств в направлении x_3 . Тогда показатели анизотропии μ_{ij} (i – направление нормали к площадке, j – направление действия силы) удовлетворяют соотношениям [149]:

$$\mu_{31} = \mu_{32} = 1 - \mu_{12} = \mu_{21}; \quad \mu_{23} = \mu_{13} = 0.5 \quad (2.1)$$

Полная энергия деформирования W , приходящаяся на единичную длину, на одном переходе вследствие свойства аддитивности энергии будет складываться из следующих компонент [141]:

$$W = W_{ye} + W_p + W_e + W_a, \quad (2.2)$$

где W_{ye} – энергия деформирования уголкового части; W_p – энергия разгибки заготовки в калибре при подсадке; W_e – энергия деформирования полки из-за подъема на последующем переходе; W_a – энергия деформирования заготовки вследствие приложения аксиальных усилий.

Энергия деформирования уголкового зоны определяется формулой:

$$W_{ye} = \sigma_1 s^2 \Theta(x_3) / 4, \quad (2.3)$$

где σ_1 – предел текучести материала в направлении x_1 , МПа; s – толщина исходной заготовки, мм; $\Theta(x_3)$ – угол подгибки заготовки, град.

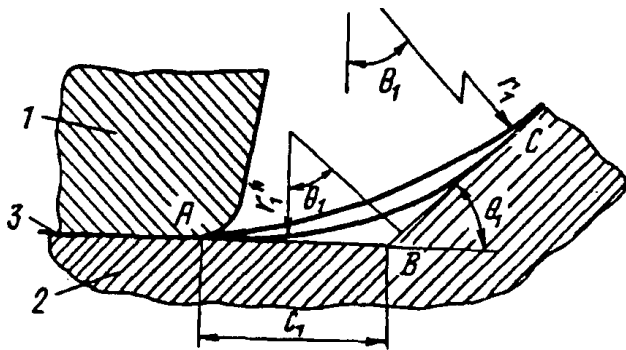


Рис. 2. 3. Геометрические параметры процесса при свободной гибке и после подсадки: 1- верхний ролик; 2 - нижний ролик; 3 – заготовка

Энергия разгибки полки (рис. 2.3) может быть определена по формуле [141]:

$$W_p = \sigma_1 s^2 \Theta(x_3) (1 - r_1^h / r_1), \quad (2.4)$$

где r_1^h , r_1 – радиусы заготовки в зоне сгиба после подсадки и при свободном формообразовании соответственно, мм.

Для обоснования формулы (2.4) рассмотрим уголковою зону на текущем переходе (см. рис. 2. 3). Если верхний ролик перехода

изготовлен так, что отрезок $AB = C_1$, то свободный участок заготовки длиной l_{AC} , не контактирующий с роликом, будет определяться по формуле:

$$l_{AC} = r_1 \Theta_1. \quad (2.5)$$

Когда развертка калибра меньше развертки заготовки на величину Δh_1 (при соблюдении условий сопряжения), происходит подсадка заготовки до радиуса r_1^h . В этом случае справедливо следующее соотношение:

$$\Delta h_1 = l_{AC} - r_1^h \cdot \Theta_1. \quad (2.6)$$

При подсадке заготовки происходит увеличение ее кривизны в уголкового части и разгибание ее с радиусом кривизны r_1 и длиной Δh_1 в соответствии с

выражением (2.6). Угол Θ^p , на который происходит разгибание, определяют с учетом формул (2.5) и (2.6):

$$\Theta^p = \Delta h_1 / r_1 = \Theta(1 - r_1^h / r_1). \quad (2.7)$$

Подставляя в выражение, аналогичное равенству (2.3), значение Θ^p из формулы (2.7), приходим к зависимости для определения энергии разгибки (2.4). Отметим, что радиусы r_1^h и r_1 являются не технологическими параметрами, а лишь текущими геометрическими параметрами, причем при $\Delta h_1 > 0$ радиус r_1 может быть виртуальным геометрическим параметром. Ясно, что $r_1^h = r_2$ при $\Delta h_1 = 0$, когда ширина развертки калибра совпадает с шириной заготовки. Реальными технологическими параметрами являются значения C_1 , Δh_1 и Θ_1 , которые могут быть назначены технологом.

Для очередного перехода k формула (2.4) остается практически неизменной, кроме замены индексов:

$$W_p = \sigma_1 s^2 \Theta(x_3)(1 - r_k^h / r_{k-1}) / 4, \quad (2.8)$$

где r_{k-1} – радиус кривизны заготовки на предшествующем переходе, мм.

На последующих переходах значения C_k , как правило, не устанавливаются, поскольку уже на первом переходе задается линия сгиба, которая в дальнейшем не подлежит переформовке. При интенсификации процесса за счет видоизменения схемы формообразования можно использовать выражение для W_p типа формулы (4) при задании конкретных значений для C_k . Значение параметра C_k не должно превышать критической величины, при которой наступает локальная потеря устойчивости заготовки.

Работу формообразования полки W_e можно вычислить, определив деформации вытяжки участков полки путем последующей факторизации ее с предельным эффективным напряжением. Найдем деформацию вытяжки из геометрического рассмотрения поверхности изгиба полки при подгибе ее на угол Θ . Перейдем от декартовых координат к цилиндрическим:

$$x_1 = r \cos \Theta; \quad x_2 = r \sin \Theta; \quad x_3 = x_3, \quad (2.9)$$

где r – расстояние от линиигиба до заданной точки полки, мм.

Приращение радиус-вектора или дифференциал дуги dS можно определить по правилам дифференциальной геометрии с учетом формулы (2.9):

$$dS = \sqrt{(1 + r^2 (d\Theta / dx_3)^2)} \cdot dx_3. \quad (2.10)$$

Для вычисления продольной деформации полки ε_e используем разложение в ряд Тейлора правой части формулы (2.10) с удержанием двух членов ряда и определение деформации:

$$\varepsilon_e = 0,5 r^2 (d\Theta / dx_3)^2. \quad (2.11)$$

Энергию деформирования полки вследствие поднятия кромки, приходящуюся на единичную длину, находят путем факторизации предела текучести и продольной деформации (2.11), с последующим интегрированием произведения по ширине и толщине полки:

$$W_e = 0.5s\sigma_2(d\Theta/dx_3)^2 \int_0^B r^2 dr = \sigma_2 s b^3 (d\Theta/dx_3)^2 / 6, \quad (2.12)$$

где σ_2 – предел текучести в направлении 3, МПа.

Энергия продольной вытяжки (сжатия) учитывается для полки, в которой присутствуют пластические деформации. Факторизация эквивалентного напряжения σ_2 и продольной деформации (2.11) с учетом кинематических характеристик процесса и эффекта изменения ширины полки [141] дает удельную энергию деформирования W_a :

$$W_a = \sigma_2 \cdot (R_k / R_{k-1} - 1) \cdot (b + r_k \Theta) s, \quad (2.13)$$

где R_k, R_{k-1} – радиус ролика на актуальном и предшествующем переходах, мм;
 b – ширина полки, мм.

Суммарная энергия с учетом формул (2.2), (2.3), (2.4), (2.12) и (2.13) может быть записана в виде:

$$W = \sigma_1 s^2 \Theta(x_3) (2 - r_k^h / r_{k-1}) / 4 + \sigma_2 \cdot s \cdot \{ (d\Theta/dx_3)^2 b^3 / 3 + (R_k / R_{k-1}) (r_k \Theta + b) \} / 2. \quad (2.14)$$

В соответствии с предположением о минимальной энергии при свободном состоянии заготовки произведем минимизацию функционала энергии ζ :

$$\zeta = \int_0^L W dx_3, \quad (2.15)$$

где L – длина зоны плавного перехода, мм.

Отметим, что $\sigma_1 = \sqrt{(\mu_{32} / \mu_{21})} \sigma_T$; $\sigma_2 = \sqrt{(\mu_{13} / \mu_{31})} \sigma_T$ [149], или с учетом выражения (2.1):

$$\sigma_1 = \sigma_T, \quad \sigma_2 = \sqrt{0.5 / (1 - \mu_{12})} \sigma_T. \quad (2.16)$$

Соотношения (2.16) надлежит учесть при использовании выражений (2.14) и (2.15). Минимизацию функционала (2.15) произведем, считая, что длина L задана так, что на первом этапе решается задача с неподвижными концами. На втором этапе длину L_k найдем из дополнительного условия через геометрические характеристики заготовки и технологической оснастки. Уравнение Эйлера – Лагранжа, полученное из условия $\delta\zeta = 0$, дает:

$$\Theta(x_3) = Ax_3^2 / (2B) + C_1 x_3 + C_2, \quad (2.17)$$

где C_1, C_2 – пока неопределенные константы, а величины A и B даются соотношениями: $A = \sigma_T \cdot s^2 \cdot (2 - r_k^h / r_{k-1}) / 4 + \sigma_T \cdot s \cdot b \cdot (R_k / R_{k-1} - 1) \cdot r_k \cdot \sqrt{0.5 / (1 - \mu_{12})} / 4$;
 $B = \sigma_T \cdot s \cdot b \cdot \sqrt{0.5 / (1 - \mu_{12})} / 3$.

Граничные условия для решения (2.17) формулируются из исходных посылок (допущение о сопряжении):

$$\Theta(0) = \Theta_0; \quad \Theta(L) = \Theta_0 + \Theta_k, \quad (2.18)$$

где Θ_0 – суммарный угол подгибки на предшествующем переходе, град;

Θ_k – угол подгибки в текущем переходе, град.

Решение (2.17) с учетом граничных условий (2.18) дает:

$$\Theta(x_3) = Ax_3^2 / (2B) + \Theta_k / L - AL / (2B) + \Theta_0. \quad (2.19)$$

Для определения соотношения, связывающего $\Theta(x_3)$ с геометрическими характеристиками калибров и заготовки, используем дополнительное условие сопряжения $\Theta(x_3)|_{0,L} = 0$, которое с формулой (2.19) и соотношениями для A и B приводит к следующей зависимости:

$$L_k = \sqrt{\frac{8 \cdot \Theta_k \cdot b^3}{3 \left\{ s \cdot \sqrt{2(1-\mu_{12})} \cdot \left(2 - \frac{r_k^h}{r_{k-1}} \right) + b \cdot \left(\frac{R_k}{R_{k-1}} - 1 \right) \cdot r_k \right\}}}, \quad (2.20)$$

где k и $(k-1)$ – индексы текущего и предыдущего переходов соответственно; r_k – относительный радиусгиба в текущем переходе.

Здесь длина зоны плавного перехода зависит от показателей анизотропии, что реально отражает реологические свойства материала. Отсутствие зависимости ее от предела текучести объясняется тем, что модель строилась в предположении, что материал заготовки – жесткопластичный, а упругими эффектами мы пренебрегли. Этому факту соответствует жесткий выбор межклетьевого расстояния, обеспечивающего формообразование без излишней переформовки заготовки.

В формуле (2.20) при стремлении толщины заготовки к нулю протяженность зоны плавного перехода увеличивается. С физической точки зрения это обосновывается так: чем тоньше заготовка, тем большую кривизну следует ей придать для ее перевода в состояние пластической деформации.

Под влиянием подсадки заготовки зона плавного перехода уменьшается, так как увеличивается кривизна заготовки и пластическое состояние охватывает большую часть заготовки по сравнению с процессом обычного профилирования, когда кривизна заготовки в зоне сгиба не изменяется ($r_k^h = r_k$). Для традиционного профилирования при равных радиусах формирующих роликов ($R_k = R_{k-1}$) и изотропного материала ($\mu_{12} = 0,5$) формула (2.20) дает известную формулу Бхаттачария – Коллинза [142].

На рис. 2.4 приведены для сравнения различные модели протяженности зоны плавного перехода, построенные с помощью программы MathCAD – 2001 Pro для заготовки толщиной 1 мм из мягкой стали. Модель Гуна Г. Я. (см. формулу (1.1)) [131] и модель Бхаттачария Д. и Коллинза И. Ф. [142] дают весьма близкие значения к предлагаемой модели, причем поведение кривых идентично. Что касается модели Тришевского И. С. и Докторова М. Е. [58], то график функции существенно отличается от графиков трех других моделей, что объясняется неточностью модели. Во – первых, сами авторы указывают, что аналитическая форма коэффициента задана «в первом приближении»; во – вторых, модель является полуэмпирической, причем, эксперименты проводились на оборудовании с большим межклетьевым расстоянием (около 1000 мм); в третьих, модель дает зависимость протяженности зоны плавного перехода

только от ширины полки, что не вполне соответствует реальному процессу формообразования.

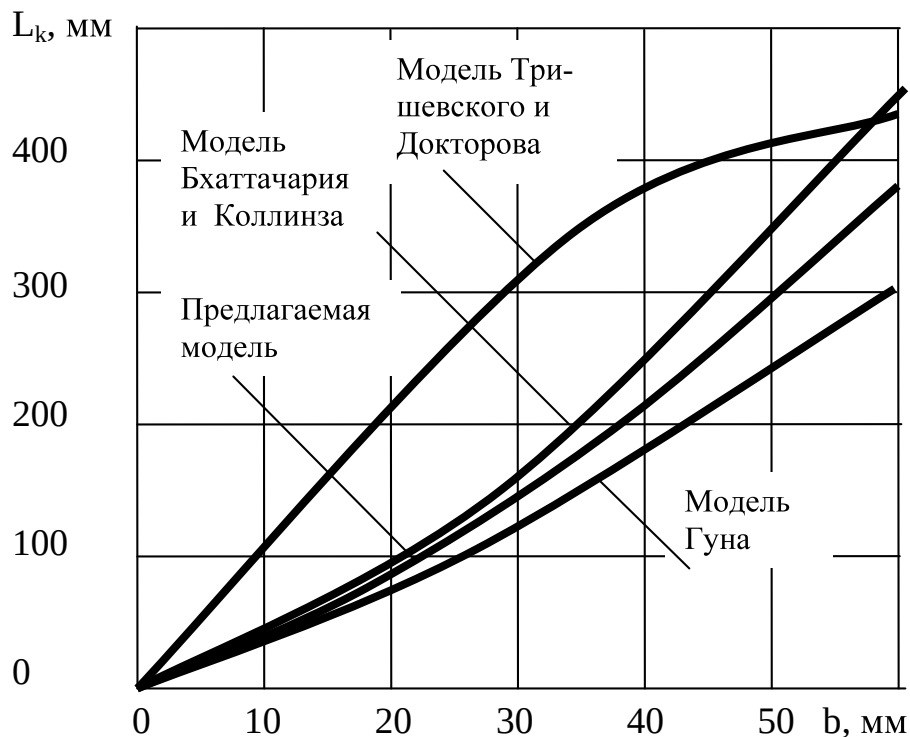


Рис. 2.4. Модели протяженности зоны плавного перехода по данным различных авторов

На рис. 2.5 представлена зависимость протяженности зоны плавного перехода от толщины заготовки и радиусагиба, показывающая уменьшение величины L_k с увеличением радиусагиба. Данная зависимость объясняется тем, что увеличение радиусагиба как бы уменьшает ширину подгибаемой полки, а кроме того, снижается общая жесткость заготовки в межкалельном пространстве и уменьшается размер области пластической деформации.

Рис. 2.6 иллюстрирует изменение L_k в зависимости от угла подгибки полки и уменьшения от перехода к переходу диаметров формирующих роликов. Здесь уменьшение протяженности зоны плавного перехода в межкалельном пространстве связано с изменением пространственной конфигурации заготовки, так называемым «развалом заготовки». К сожалению, модель не прогнозирует данного вида потери устойчивости периферийных элементов в зависимости от L_k , однако в разделе 3.5 эти вопросы затрагиваются.

Увеличение диаметров формирующих роликов от перехода к переходу позволяет производить натяжение кромки, при этом протяженность зоны плавного перехода при определенных соотношениях диаметров становится соизмеримой с межкалельным расстоянием станка или даже (гипотетически) превышает его (рис. 2.7).

Выбор режимов подгибки и соотношений диаметров формирующих роликов в этом случае позволяет производить натяг кромки заготовки во избежание

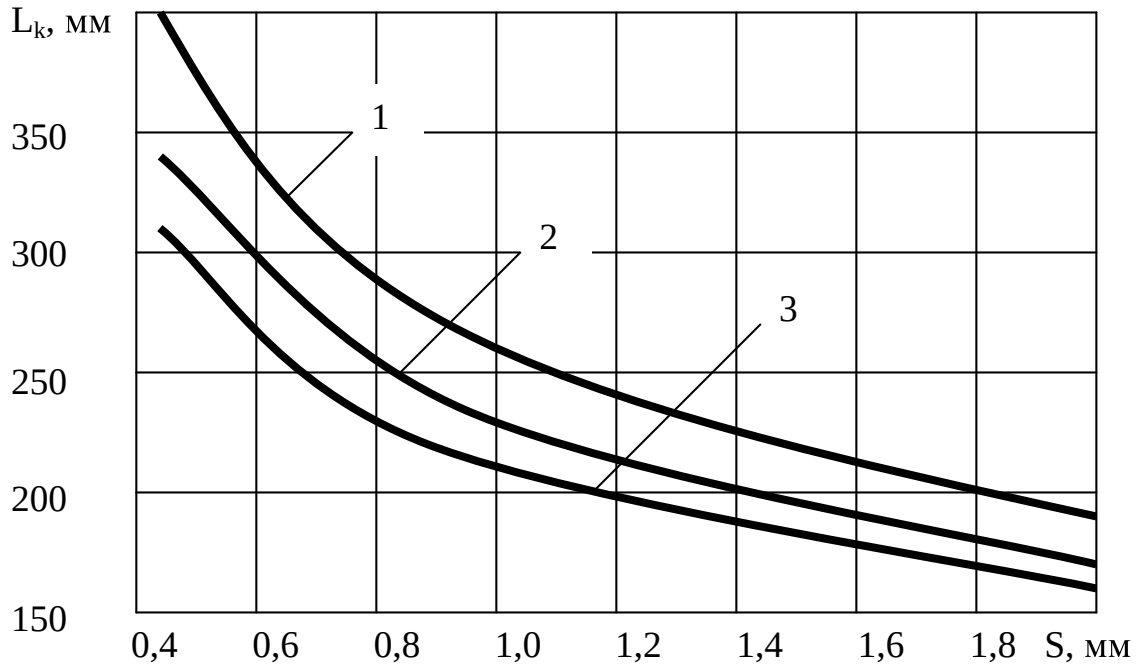


Рис. 2.5. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от толщины заготовки и радиусагиба: 1, 2, 3 – $r = 2s, 4s, 10s$ соответственно

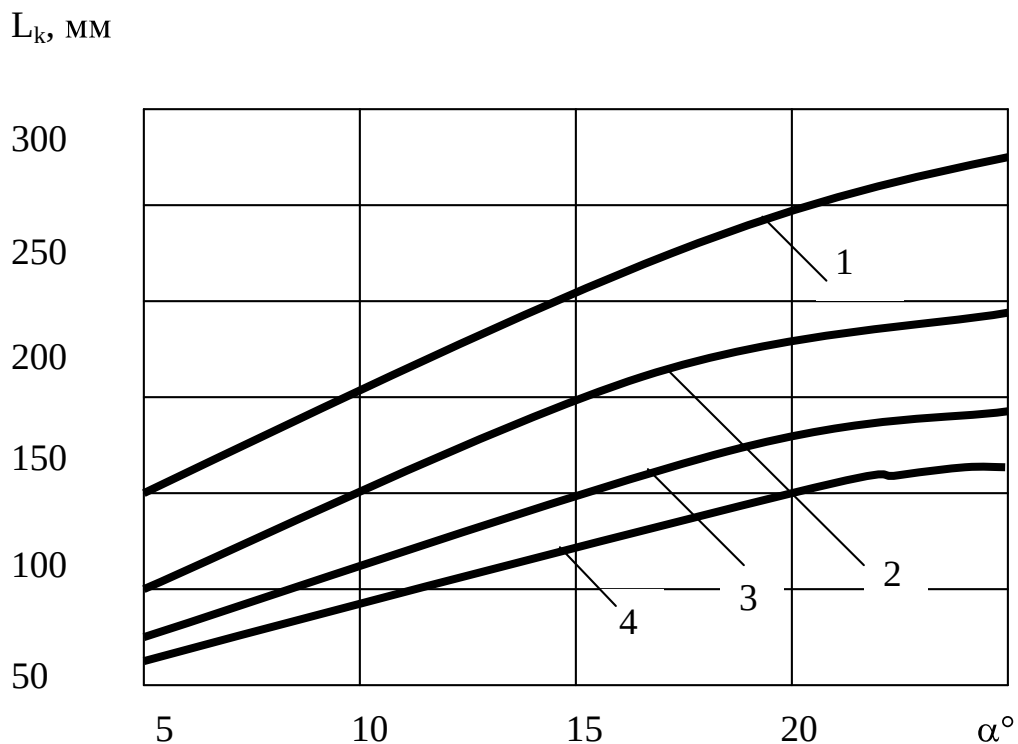


Рис. 2.6. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и относительного уменьшения диаметров формирующих роликов: 1 – $\chi = 0\%$; 2 – $\chi = 1,1\%$; 3 – $\chi = 2,2\%$; 4 – $\chi = 3,3\%$

кромковой волнистости без ущерба для других параметров процесса (см. раздел 3). В работе [150] рассмотрены различные варианты обеспечения заднего натяга профиля, уменьшающего неравномерность распределения продольных деформаций в поперечном сечении профиля. В первой клетке задний натяг обеспечивают за счет валкового направляющего устройства с регулируемым зазором за счет упругого обжатия плоской заготовки по толщине или применением, например, трехвалкового направляющего устройства, в котором два валка расположены как в обычной роликовой паре, а третий валок, расположенный перед ними по ходу движения заготовки, имеет вертикальное смещение, причем зазор между валками направляющего устройства не превышает толщины заготовки (рис.2.8а, г).

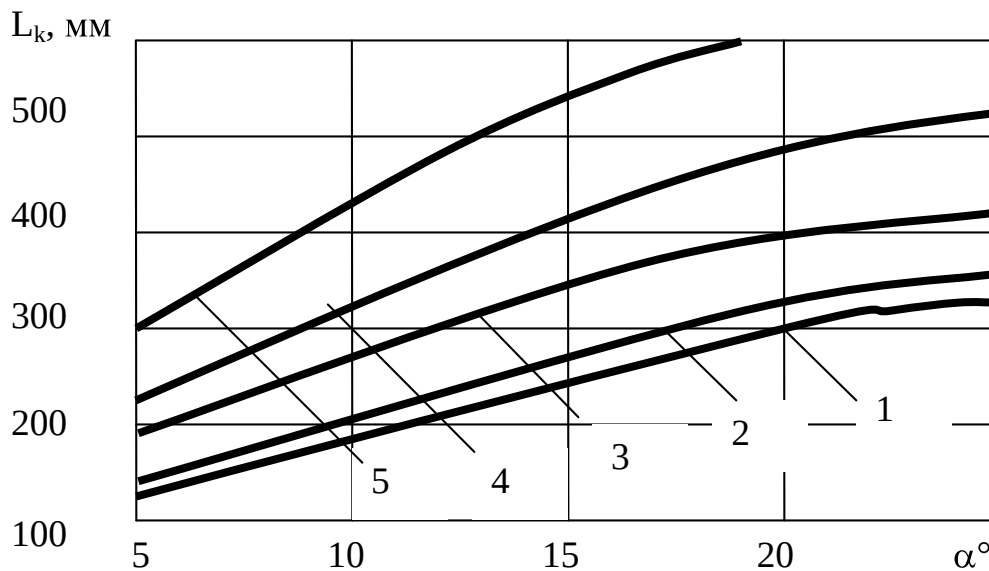


Рис.2.7. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и относительного увеличения диаметров формирующих роликов:
 1 – $\chi = 0\%$; 2 – $\chi = 0,22\%$; 3 – $\chi = 0,44\%$; 4 – $\chi = 0,66\%$; 5 – $\chi = 0,88\%$

В последующих переходах натяг обеспечивается несколькими путями. Во – первых, в ряде роликовых пар возможно создается режим волочения путем использования неприводных роликовых пар (рис.2.8б), во – вторых, применением профилегибочных станков специальной конструкции [151], в которых число зубьев привода валов увеличивается от перехода к переходу (рис. 2.8д). В – третьих, можно предусмотреть натяг профиля в межклетьевом пространстве на стадии проектирования роликовой оснастки, увеличивая диаметры формирующих роликов от перехода к переходу (рис. 2.8в). И, наконец, натяг заготовки можно создать за счет ее дифференцированного обжатия в калибрах роликовых пар (рис. 2.8е). Последний способ является эффективным с точки зрения предотвращения кромковой волнистости, поскольку он позволяет выравнивать продольные деформации стенки и полок, однако требует высокой точности настройки профилегибочного станка при удовлетворении ряда условий на стадии

проектирования оснастки. При применении стандартного оборудования наиболее приемлемым является способ последовательного увеличения диаметров формирующих роликов с целью обеспечения режима натяга заготовки в процессе формообразования.

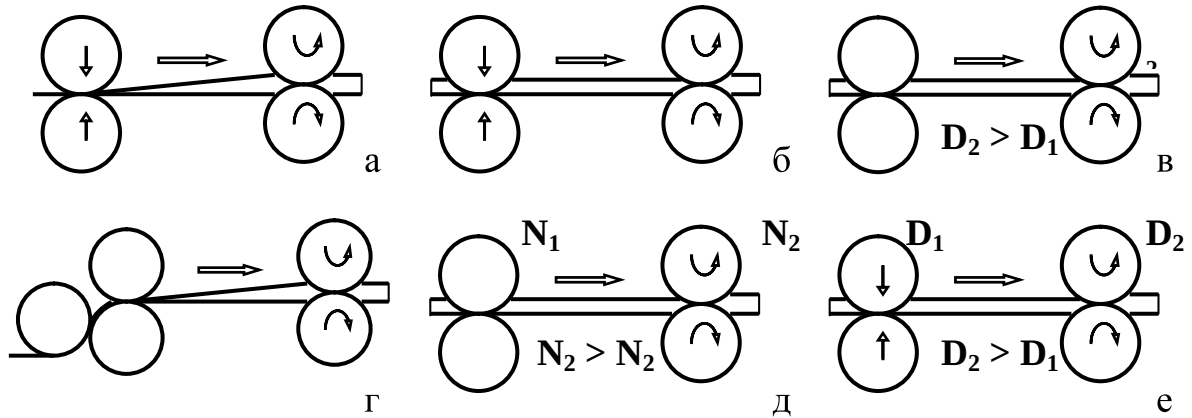


Рис. 2. 8. Схемы обеспечения заднего натяга

На рис. 2.9 указана зависимость L_k от коэффициента анизотропии, впрочем, как видно из графиков, колебания протяженности зоны плавного перехода для изотропного тела (кривая 2) и анизотропного тела (кривые 1 и 3) не превышают 4 – 7 %. Приведенная зависимость может оказаться полезной при изготовлении профилей из композиционных материалов.

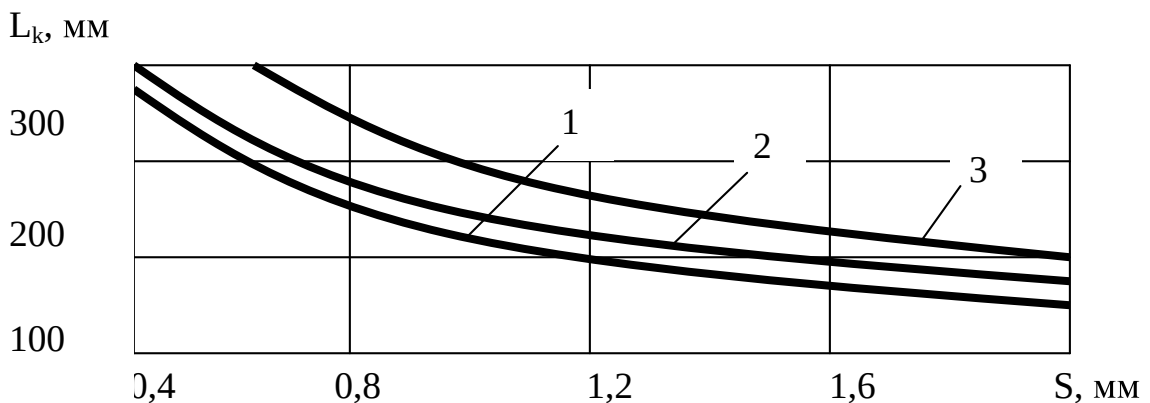


Рис. 2.9. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от толщины заготовки и коэффициента анизотропии μ_{12} : 1 – $\mu_{12} = 0,34$; 2 – $\mu_{12} = 0,5$; 3 – $\mu_{12} = 0,68$

Модель (2.20) может использоваться при разработке технологии формообразования. Так, при проектировании конфигураций роликовых калибров необходимо следить, чтобы выбор параметров не приводил к превышению расчетной величиной протяженности зоны плавного перехода величины межклетьевого расстояния. В частности, ограничение на угол подгибки в текущем технологическом переходе, в соответствии с формулой (2.20), следующее:

$$\Theta_k < 3 \cdot L^2 \cdot \left\{ s \cdot \left(2 - r_k^h / r_{k-1} \right) \sqrt{2 \cdot (1 - \mu_{12})} + b \cdot (R_k / R_{k-1} - 1) \cdot r_k \right\} / (8 \cdot b^3). \quad (2.21)$$

При нарушении условия (2.21) наблюдаются излишние энергетические затраты на переформовку, необоснованное деформационное упрочнение, приводящее к снижению ресурса пластичности, создание дополнительных остаточных напряжений, ухудшающих геометрию профиля при последующих термообработках, создание продольной кривизны или даже кромковой волнистости [141].

Длину зоны плавного перехода с небольшим избытком (например, в 10%) можно взять в качестве межклетьевого расстояния при проектировании оборудования. Метод интенсивного деформирования позволяет уменьшить межклетьевое расстояние и, как следствие, уменьшить габариты оборудования и его массу. Минимизация параметров оборудования особенно эффективна при разработке оборудования под строго ограниченную номенклатуру профилей. Таким образом, использование разработанной модели позволяет сократить производственные затраты на стадии изготовления оборудования за счет экономии материалов, а на стадии его эксплуатации – за счет уменьшения его габаритов (сокращение производственных площадей).

2.4. Определение углов подгибки полок

При мелкосерийном производстве гнутых профилей в роликах в условиях ограниченного числа переходов напряженно–деформированное состояние заготовки (полосы) в межклетьевом пространстве и контактной зоне текущего технологического перехода определяет величину продольного прогиба и наличие/отсутствие кромковой волнистости на полках производимых профилей [58, 141]. Кромковая волнистость является, вообще говоря, неисправимым браком, а значительный продольный прогиб по выходу из последней пары роликов в большинстве случаев также приводит к потере устойчивости полок при попытке исправить его с помощью правильного устройства. Такая ситуация является типичной при изготовлении широкополочных тонкостенных профилей с соотношением ширины полки и ее толщины более тридцати при неверном выборе углов подгибки по переходам. При прочих равных условиях предотвращение вышеуказанных дефектов достигается равномерным распределением продольных пластических деформаций подгибаемых полок по переходам [147, 152]. Однако взаимосвязь деформаций и углов подгибки до настоящего времени не была представлена реалистичными моделями, позволяющими производить расчет углов подгибки полок по переходам, а потому последние назначались на основании опыта разработчика (см. раздел 1.5).

Определим деформации швеллерного профиля с шириной дна C , шириной подгибаемой полки b и толщиной s в роликах k -го перехода. Закономерности процесса формообразования швеллерного профиля могут быть обобщены на некоторые более сложные типы профилей путем введения понятия «приведенной жесткости» подгибаемой полки [141]. В контактной зоне подгибка пол-

ки производится коническими поверхностями роликов, где происходит как бы «наматывание» её на ролик (рис. 2.10).

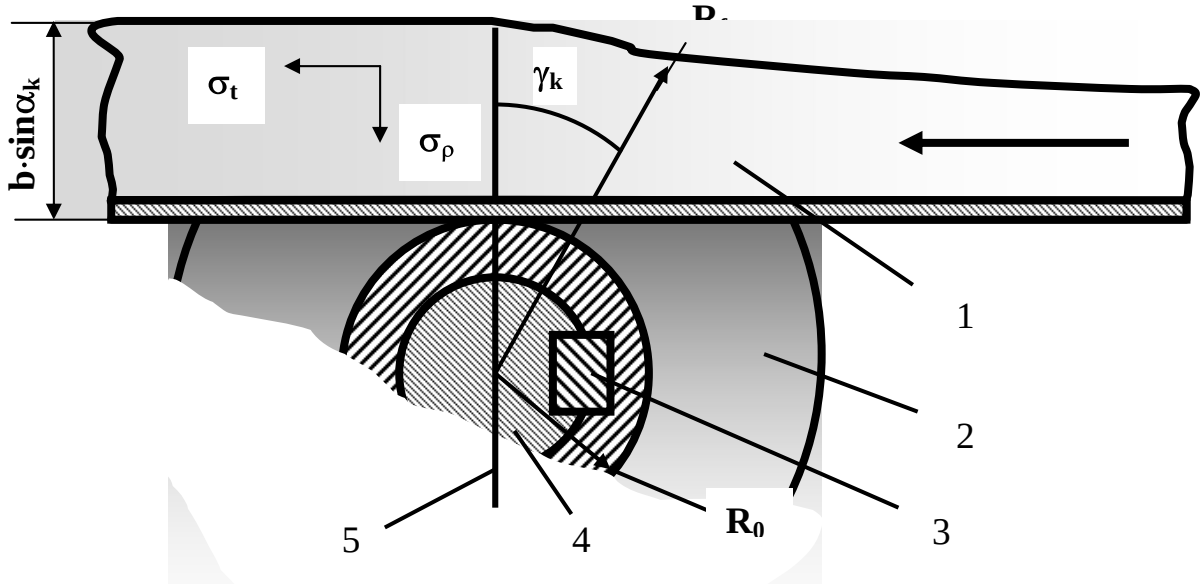


Рис. 2.10. Контактная зона: 1 – заготовка; 2 – нижний формирующий ролик; 3 – шпонка; 4 – вал станка; 5 – осевая плоскость текущего перехода

Обозначим напряжения заготовки в направлении образующей конической поверхности, проходящей через данную точку, σ_ρ ; перпендикулярные им напряжения и параллельные оси профилирования σ_t ; нормальные к поверхности заготовки напряжения σ_n .

Подгибаемая полка в контактной зоне может быть представлена конической оболочкой, для которой уравнение равновесия имеет вид [128]:

$$\rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \sigma_\rho - \frac{f \cdot \rho}{\sin \alpha_k} \cdot \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_t}{R_t} \right) = 0, \quad (2.22)$$

где f – коэффициент трения между заготовкой и роликом; R_ρ , R_t – радиусы кривизны поверхности заготовки в направлении образующей конуса валков и в окружном направлении соответственно, мм; α_k – суммарный угол подгибки полки в текущем переходе k , град.

В уравнении (2.22) индексы перехода у напряжений и радиусов кривизны условно опущены. При ширине развертки, заготовки превышающей на величину $2\Delta h$ развертку калибра, граничное условие на кромке имеет вид:

$$\sigma_\rho(R_f^k) = \sigma_a. \quad (2.23)$$

где $R_f^k = R_f^0 + b \cdot \sin \alpha_k$ (R_f^0 – радиус базовой поверхности нижнего формирующего ролика), мм; $\sigma_a(\Delta h)$ – напряжение торцевого поджатия, определенное в [135].

Решение дифференциального уравнения (2.22) при $R_\rho = \infty$, $R_t = \rho / (\cos \alpha_k)$ с соответствующим условием пластичности, учитывающим принятые допущения, и граничным условием (2.23) приводит к следующей зависимости:

$$\sigma_{\rho}(\rho) = \frac{R_f^k}{\rho} \cdot \left[\sigma_a + \sigma_s \cdot \left(\frac{f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_k}{1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_k} \right) \right] - \sigma_s \cdot \frac{f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_k}{1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_k}. \quad (2.24)$$

Для определения деформаций в контактной зоне используем допущение о подобии схем напряженного и деформированного состояния полки:

$$\frac{\sigma_{\rho} - \sigma_n}{\sigma_t - \sigma_n} = \frac{e_{\rho}^c - e_n^c}{e_t^c - e_n^c}, \quad (2.25)$$

где e_{ρ}^c, e_n^c, e_t^c – логарифмические деформации по ширине, толщине и вдоль полки в направлении профилирования соответственно.

Используя допущение о несжимаемости материала и пренебрежимой малости напряжений по толщине заготовки, из соотношения (2.25) получаем:

$$e_n^e = \frac{\eta + 1}{\eta - 2} \cdot e_t^c, \quad e_{\rho}^c = \frac{1 - 2 \cdot \eta}{\eta - 2} \cdot e_t^c, \quad (2.26)$$

где $\eta = \sigma_{\rho} / \sigma_t$.

Угол подгибки полки θ_k в текущем переходе определяет уровень ее деформаций. В контактной зоне приобретаемые пластические деформации полки определяются через угол контакта роликов и заготовки с учетом фактора ξ увеличения жесткости профиля по мере поднятия полок:

$$\xi = \frac{J_k}{J_n} \approx (\sin \alpha_k)^2, \quad (2.27)$$

где J_k, J_n – моменты инерции трансверсального сечения заготовки на текущем k -ом переходе и окончательном n -ом переходе относительно горизонтальной оси, проходящей через центр масс сечения, соответственно, мм^4 . Отметим, что на возможность учета жесткости заготовки в виде (2.27) указано в работе [58].

Угол контакта заготовки и роликов k -го перехода γ_k можно определить, решая совместно уравнение окружности (сечение роликов вертикальной плоскостью, параллельной оси профилирования) и уравнение следа винтовой линии (траектории точек, равноотстоящих от кромки заготовки) [141]:

$$\gamma_k = \arccos \left[\frac{L_k^2 - (\rho \cdot \sin \theta_k)^2}{L_k^2 + (\rho \cdot \sin \theta_k)^2} \right], \quad (2.28)$$

где L_k – протяженность зоны плавного перехода перед k -ым калибром, зависящая от угла подгибки, ширины полки и толщины материала заготовки, мм.

Принимая линейный закон изменения продольных деформаций по ширине полки согласно принятому допущению и вводя индексацию переходов, с учетом формулы (2.28), после несложных преобразований, получим значение продольной логарифмической деформации в контактной зоне e_{tk}^c :

$$e_{tk}^c = \frac{(\sin \alpha_k)^2}{12} \cdot \left[\frac{\rho - R_0^k}{b \cdot \sin \alpha_k} \right] \cdot \gamma_k^2 \quad (2.29)$$

где $\rho = R_0^k + r \cdot \sin \alpha_k$, причем значение r удовлетворяет условию: $b \geq r \geq 0$.

Продольная деформация в зоне плавного перехода e_{tk}^f определяется соотношением, полученным на основе работы [141]:

$$e_{tk}^f = \frac{\theta^2}{2 \cdot (L_k)^2} \cdot \left[\frac{\rho - R_0^k}{\sin \alpha_k} \right]^2. \quad (2.30)$$

С учетом свойства аддитивности логарифмических деформаций и зависимостей (2.29) и (2.30), получим суммарное значение продольной пластической деформации подгибаемой полки:

$$e_{tk} = e_{tk}^c + e_{tk}^f, \quad (2.31)$$

где e_{tk} – суммарная продольная деформация подгибаемой полки на уровне осевой плоскости текущего технологического перехода.

Рассмотрим также суммарные деформации полки в поперечном направлении $e_{\rho k}$ и по толщине e_{nk} . Из соотношений (2.26), с учетом свойства аддитивности логарифмических деформаций и введения индексации переходов, получим деформации вблизи кромки ($\eta = 0$, $r = b$):

$$e_{nk}^{kp} \approx -\frac{1}{2} \cdot (e_{tk}^{c kp} + e_{tk}^{f kp}), \quad e_{\rho k}^{kp} \approx -\frac{1}{2} \cdot (e_{tk}^{c kp} + e_{tk}^{f kp}), \quad (2.32)$$

где e_{nk}^{kp} , $e_{\rho k}^{kp}$ – деформации на кромке по толщине и в поперечном направлении соответственно; $e_{tk}^{c kp}$, $e_{tk}^{f kp}$ – продольные деформации на кромке в контактной и свободной зоне соответственно.

Деформации 2.32 малы и практически не могут оказывать влияния на устойчивость периферийных элементов.

На рис. 2.11 приведены графики зависимости продольной деформации кромки от угла подгибки полки в текущем переходе θ и суммарного угла подгибки в соответствии с формулой (2.31) при $R_0 = 45$ мм, $b = 45$ мм, $\rho = R_f$. Как уже отмечалось, одним из основных условий нормального протекания процесса профилирования является равномерность распределения деформаций подгибаемых полок по переходам. При прочих равных условиях эти деформации зависят от ширины полки, суммарного угла подгибки и угла подгибки в текущем переходе. Можно указать относительно простой алгоритм обеспечения данного условия при разработке технологии профилирования. При заданном числе переходов (что определяется наличным оборудованием) вычисляют средний угол подгибки θ_{cp} за переход по формуле:

$$\theta_{cp} = \frac{\alpha_N^\Sigma}{N}, \quad (2.33)$$

где α_N^Σ – суммарный угол между дном и полкой готового профиля по чертежу; N – общее число переходов.

Затем вычисляют среднюю деформацию процесса формообразования за переход e_t^{cp} согласно соотношению:

$$e_t^{cp} = \frac{e_{tk}(\theta_{cp}, \alpha_1) + e_{tk}(\theta_{cp}, \alpha_N)}{2}. \quad (2.34)$$

В формуле (2.34) $\alpha_1 = \theta_{cp}$, $\alpha_N = \alpha^\Sigma$.

Значения $e_{tk}(\theta_{cp}, \alpha_1)$ и $e_{tk}(\theta_{cp}, \alpha_N)$ в формуле (2.34) можно определить расчетным путем в соответствии с зависимостью (2.31) или по графикам рис. 2.11. Затем из уравнения (2.31) численным методом можно определить угол подгибки для каждого из переходов. Однако проще это сделать графически.

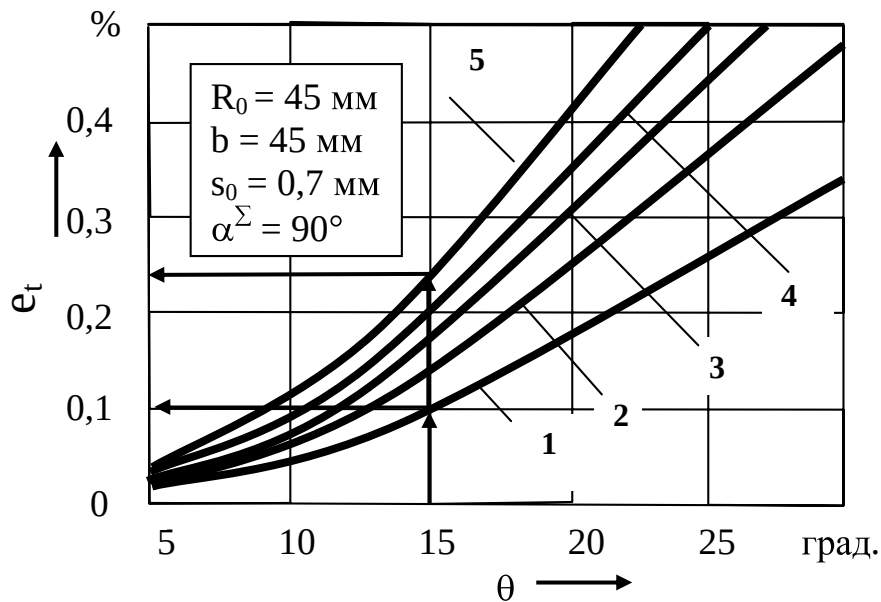


Рис. 2.11. Графики для определения средней продольной деформации кромки: 1 — $\alpha = 15^\circ$; 2 — $\alpha = 30^\circ$; 3 — $\alpha = 45^\circ$; 4 — $\alpha = 60^\circ$; 5 — $\alpha = 90^\circ$

По формулам (2.28) – (2.31), (2.33) и (2.34) выполнены расчеты деформаций кромки профиля в среде MathCAD 2001 Pro и построены графики рис. 2.11 и 2.12. На рис. 2.11 линиями со стрелками указана процедура определения $e_{tk}(\theta_{cp}, \alpha_1)$ и $e_{tk}(\theta_{cp}, \alpha_N)$ графически для первого ($k = 1$) и последнего ($k = N$) перехода. На рис. 2.12 представлены зависимости продольной деформации кромки от угла подгибки и номера перехода; последний условно ассоциирован с соответствующим значением суммарного угла подгибки на текущем переходе при равномерном разбиении угла между дном и полкой готового профиля по переходам. Пунктирными стрелками обозначены промежуточные кривые, проходящие через вертикальные маркеры переходов при одном и том же уровне деформации кромки, рассчитанной на основе данных рис. 2.11 и формулы (2.31). Углы, соответствующие пунктирным линиям со стрелками, являются исходными для разработки технологии. Следует заметить, что для формообразования профилей с широким дном ($C > 2b$) режимы

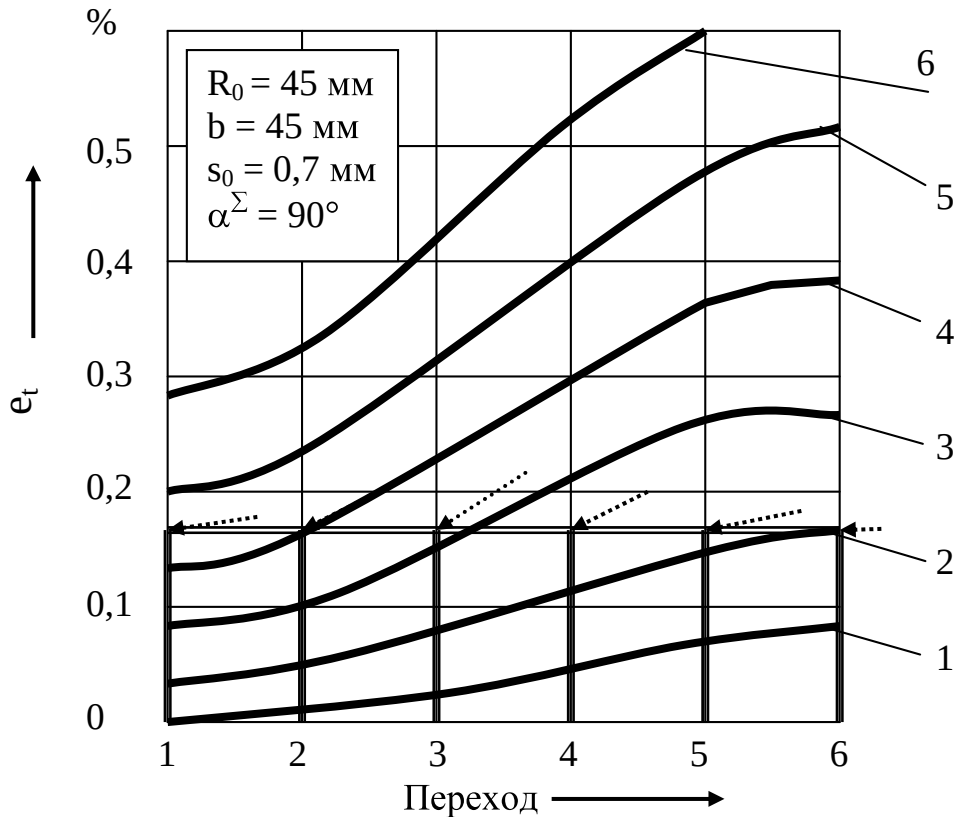


Рис. 2.12. График определения углов подгибки по переходам: 1 – $\theta = 5^\circ$; 2 – $\theta = 10^\circ$; 3 – $\theta = 15^\circ$; 4 – $\theta = 20^\circ$; 5 – $\theta = 25^\circ$; 6 – $\theta = 30^\circ$

подгибки могут назначаться более жесткими, чем расчетные. Указанное обстоятельство связано с «ослаблением» углов подгибки за счет прогиба донной части профиля (см. обсуждение данного вопроса в разделе 3).

2.5. Зависимость деформаций подгибаемой полки от способа предотвращения волнистости ее кромки

Исключив из рассмотрения упомянутые в разделе 2.1 схемы, ограничимся изучением влияния остальных способов (см. рис. 2.1) на деформационные характеристики подгибаемых элементов при изготовлении швеллерных профилей [148]. В общем случае логарифмическая деформация подгибаемых полок в k -ом переходе функционально представляется в следующем виде:

$$e_k = f_k(\Pi_o, \Pi_c, \Pi_n, \Pi_d, \Gamma_n, M_n) \quad (2.35)$$

где f_k – функция деформации; $\Pi_o, \Pi_c, \Pi_n, \Pi_d$ – параметры оборудования, оснастки, настройки процесса и дополнительных устройств соответственно; Γ_n, M_n – геометрические и механические характеристики профиля соответственно.

Конкретизируем общую зависимость (2.35) с целью перехода к количественным характеристикам процесса профилирования. В межклетьевом про-

пространстве между $(k - 1)$ -ым и k -ым переходами (рис. 2.13) заготовку можно разделить на зону упругого состояния 1, зону свободного формообразования 2 и контактную зону 3. Заготовка приобретает продольные пластические деформации во второй и третьей зонах. Вычислим предварительно угол обхвата γ нижнего ролика k -го перехода заготовкой при формообразовании, полагая, что контакт заготовки и ролика начинается в точке пересечения прямой, соединяющей точки пересечения кромки заготовки с осевыми плоскостями $(k - 1)$ -го и k -го переходов.

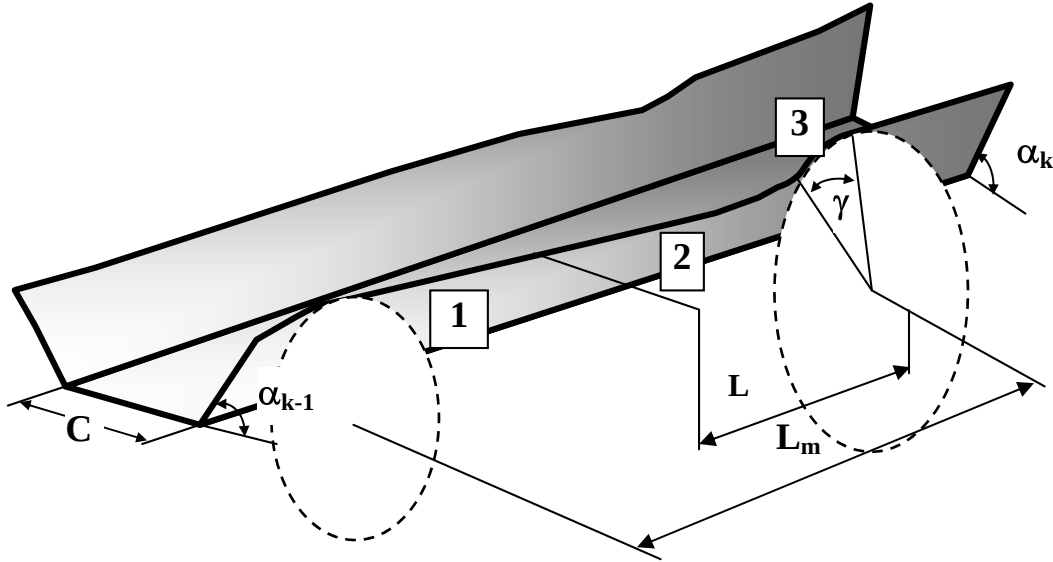


Рис. 2.13. Зоны заготовки в межклетьевом пространстве: 1 – зона стабилизации; 2 – зона плавного перехода; 3 – контактная зона

Расчеты показывают [148], что

$$\gamma(L_M) = \arccos\left(\frac{L_M^2 - (b \cdot \sin \theta_k)^2}{L_M^2 + (b \cdot \sin \theta_k)^2}\right), \quad \theta_k = \alpha_k - \alpha_{k-1}, \quad (2.36)$$

где α_k, α_{k-1} – углы подгибки на k -ом и $(k - 1)$ -ом переходах соответственно; L_M – межклетьеовое расстояние, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм.

Формула (2.36) аналогична зависимости (2.28) в разделе 2.4, однако здесь входящие параметры определены применительно к способу, связанному с натягом кромки.

В зоне 2 деформацию можно определить из следующих геометрических соотношений. Полное смещение кромки заготовки Δ вычисляется по формуле:

$$\Delta = b \cdot \sqrt{(\cos \alpha_{k-1} - \cos \alpha_k)^2 + (\sin \alpha_{k-1} - \sin \alpha_k)^2}. \quad (2.37)$$

Произведя преобразования в формуле (2.37) и используя определение логарифмической деформации [128], с учетом соотношения (2.36) получим:

$$e_k^f = \ln \sqrt{1 + \left[\frac{2 \cdot b \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{L - (R_k^0 + b \cdot \sin \theta) \cdot \sin \gamma(L_M)} \right]^2}, \quad (2.38)$$

где e_k^f – продольная деформация кромки заготовки в зоне свободного формообразования на k -ом переходе; R_k^0 – радиус катающих валков под стенкой в k -ом переходе, мм.

Значение L в формуле (2.38) является функцией угла подгибки, ширины полки, толщины заготовки и параметров оснастки [141].

В контактной зоне для случая, когда линия профилирования – прямая, продольная деформация кромки e_k^c определяется соотношением:

$$e_k^c = \ln \frac{\gamma(L_M)}{\sin \gamma(L_M)}. \quad (2.39)$$

Исследования показывают [138], что изменение формы линии профилирования (рис. 2.1, схема 3.1) существенно влияет на деформационные характеристики подгибаемых полок, так что зависимость деформации кромки от формы линии профилирования (или углов захода и выхода профиля в вертикальной плоскости k -го калибра) можно задать формулой:

$$e_k^\beta = \ln(1 - \eta_k^1 \cdot \beta_k^1)(1 - \eta_k^2 \cdot \beta_k^2), \quad (2.40)$$

где η_k^1, η_k^2 – коэффициенты, определенные в работе [148]; β_k^1, β_k^2 – углы захода и выхода профиля в k -ом переходе.

Используя свойство аддитивности логарифмических деформаций, из соотношений (2.38) – (2.40) получим продольную e_k деформацию кромки в k -ом переходе:

$$e_k = e_k^f + e_k^c + e_k^\beta. \quad (2.41)$$

Очевидно, суммарную деформацию после k -го перехода можно определить суммированием деформаций полок (2.41) на всех переходах:

$$e_k^\Sigma = \sum_{i=1}^k e_i. \quad (2.42)$$

Возможность появления кромковой волнистости можно прогнозировать, сравнивая накопленную деформацию (2.42) с критической деформацией, соответствующей потере устойчивости полки, согласно, например, работе [152]. На рис. 2.14 представлены зависимости продольных деформаций кромки от параметров процесса, связанных с тем или иным способом предотвращения кромковой волнистости. На рис. 2.14а по оси ординат представлена деформация $efc = e_k^f + e_k^c$ в зависимости от углов подгибки и ширины полки профиля. Деформация efc несколько снижается с шириной подгибаемой полки, что обусловле-

но влиянием зоны плавного перехода. Однако с точки зрения потери устойчивости полки большее значение имеет ее ширина. Поэтому при одном и том же значении деформации полка, кромковой волнистости будет подвержена та, ширина которой больше.

На рис. 2.14б приведены графики зависимости продольной деформации от углов захода и выхода профиля при ширине полки 45 мм.

Суммарная деформация при изменении углов захода уменьшается ввиду разных знаков слагаемых деформаций. Как видно на рис. 2.14б, большее влияние на продольную деформацию имеют углы выхода, чем углы захода. Углы захода и выхода могут быть пересчитаны на форму линии профилирования по переходам. Если подсчитать деформации по формуле (2.42), то в отсутствие потери устойчивости полку можно вычислить и относительное удлинение профиля. Экспериментальные данные (см. раздел 3) также свидетельствуют об удлинении профиля при формообразовании. Это обстоятельство лишь подтверждает наличие пластических зон на участках заготовки, примыкающих к роликовому калибру.

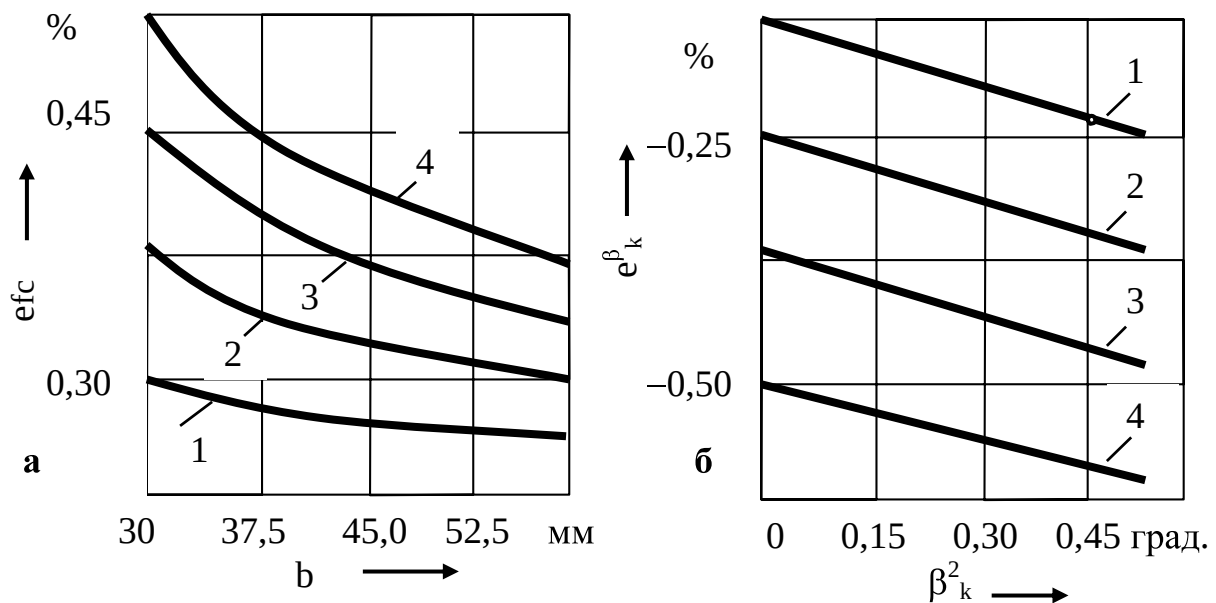


Рис. 2.14. Зависимость деформаций кромки от параметров процесса:

а – от ширины полки b и углов подгибки θ : 1 – $\theta = 6^\circ$, 2 – $\theta = 12^\circ$, 3 – $\theta = 18^\circ$, 4 – $\theta = 24^\circ$; б – от углов захода β_k^1 и выхода β_k^2 : 1 – $\beta_k^1 = 0^\circ$, 2 – $\beta_k^1 = 1^\circ$, 3 – $\beta_k^1 = 2^\circ$, 4 – $\beta_k^1 = 3^\circ$.

По сравнению с влиянием геометрических характеристик сечения профиля и углов подгибки влияние углов захода и выхода является более эффективным инструментом воздействия на деформационные характеристики полку, что связано с режимами настройки и применением дополнительных устройств, влияющих в большей степени на протяженность зоны плавного перехода и, следовательно, на деформацию efc .

Однако использование этих способов предотвращения кромковой волнистости сопряжено с некоторым усложнением технологии и их применение целесообразно лишь в обоснованных случаях (см. раздел 4).

2.6. Критерий возникновения кромковой волнистости

При подгибке полки на k – ом переходе ее продольная деформация определяется соотношением (2.41), а суммарная деформация, приобретенная полкой к k – ому переходу включительно, – формулой (2.42), в которой учтено влияние последующих клеток (см. формулу (2.40) и рис. 2.14). Картина распределения деформаций полок по переходам в этой связи может быть различной в зависимости от соотношения геометрических параметров сечения профиля и расположения калибров по отношению друг к другу.

В отсутствие последующих клеток профиль приобретает продольную кривизну радиуса R_L (рис. 2.15), который можно определить экспериментально, устранив последующие переходы. Приняв приемлемую базу измерения длины профиля (например $L_b = 1000$ мм) и производя замеры стрелы прогиба h_k , радиус продольной кривизны R_L можно определить по формуле:

$$R_L^k = \frac{h_k^2 + L_k^2/4}{2 \cdot h_k}. \quad (2.43)$$

Для сечения профиля в текущем переходе можно определить положение центра тяжести h_k^{cg} относительно дна профиля по формуле:

$$h_k^{cg} = \frac{\int_{(A)} y dA}{\int_{(A)} dA}, \quad (2.44)$$

где y – координата центра тяжести элементарной площадки с поверхностью dA .

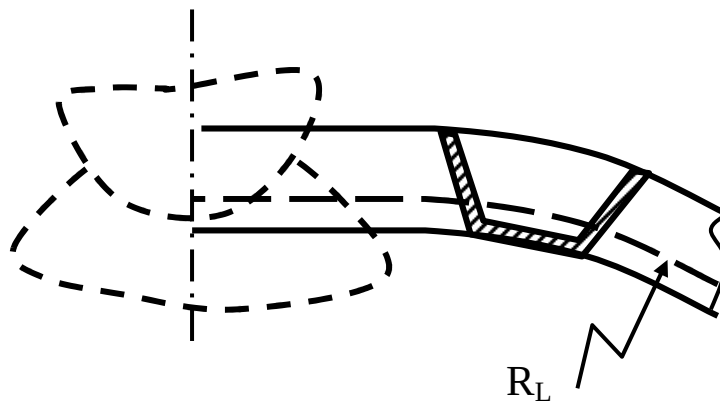


Рис. 2.15. Продольная кривизна профиля после очередного перехода в отсутствие последующих клеток

Эффективную продольную деформацию e_k^e на кромке с учетом формул (2.43) и (2.44) можно определить следующим образом:

$$e_k^e \approx \ln \left[\frac{H_k - h_k^{cg}}{R_L^k} + 1 \right], \quad (2.45)$$

где H_k — высота профиля после k — го перехода, мм.

Наличие последующих клеток приводит к спрямлению профиля путем подачи возвращающей силы F_k в очаг пластической деформации на уровне осевой плоскости текущего перехода (рис. 2.16). В осевой плоскости периферийные элементы полок находятся в пластическом состоянии, в то время как донная часть профиля может пребывать в упруго-пластическом состоянии. Поворот сечения относительно горизонтальной оси в зависимости от соотношения геометрических параметров и условий формообразования приводит к возникновению пластического шарнира [153]. Поэтому расчетные значения деформаций (2.42) могут несколько отличаться от эффективных продольных деформаций (2.45), определяемых экспериментально. Деформирование заготовки продолжается и за осевой плоскостью по ходу движения профиля в зоне пластического шарнира, причем, настройкой оборудования продольные деформации полок могут быть уменьшены не только равномерно по переходам, но даже и в одном из переходов в соответствии с формулами (2.40), (2.41). В станках с фиксированным положением нижних рабочих валов изменение углов захода профиля в калибр и его выхода реализуется исключительно изменением базовых диаметров формирующих роликов, что серьезно осложняет процесс отработки технологии. Поэтому профилегибочное оборудование обычно имеет регулируемые нижние валы клеток.

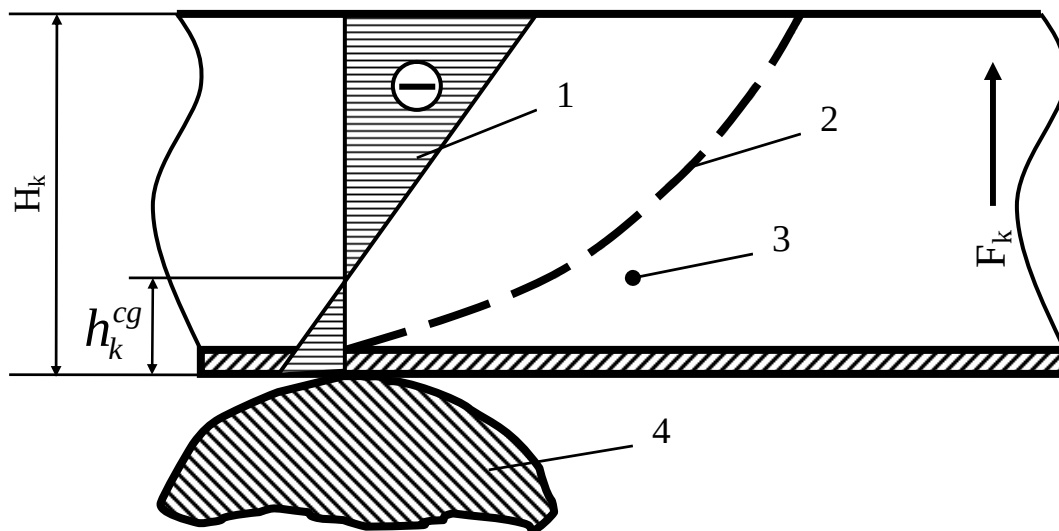


Рис. 2.16. Схема влияния последующего перехода: 1 — эпюра напряжений от действия силы F_k ; 2 — контур верхнего ролика; 3 — профиль; 4 — нижний ролик

Остаточные неустраненные в текущем переходе продольные деформации полок вызывают «набегание» материала по отношению к донной части профиля, что является причиной возникновения сжимающих напряжений полок, приводящих к потере устойчивости полок в форме кромковой волнистости [154].

Для установления критических деформаций полк, приводящих к потере устойчивости, воспользуемся результатами модельной задачи гибки профиля по контуру полками во внутрь (рис. 2.17), позволяющей определять критические напряжения сжатия полок σ_k^{cr} [155, 156]:

$$\sigma_k^{cr} = k^* \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \sqrt{\tau_k^*}}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{s}{H_k - h_k^{cg}} \right)^2, \quad (2.46)$$

где k^* – коэффициент, учитывающий условия закрепления краев полки; E, μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; s – толщина стенок профиля, мм; H_k, h_k^{cg} – высота профиля и координата центра тяжести сечения профиля на k – ом переходе соответственно, мм.

$$\text{Здесь } H_k - h_k^{cg} \approx \frac{b + c}{2 \cdot b + c} \cdot b \cdot \sin \alpha_k,$$

где b, c – ширина полки и дна профиля соответственно, мм; α_k – угол подгибки полки профиля на текущем переходе, град.

В формуле (2.46) величина τ_k^* определяется следующим образом:

$$\tau_k^* = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma_k}{de_k} \Big|_{cr}, \quad (2.47)$$

где σ_k, e_k – действующее напряжение и соответствующая ему деформация.

Приняв закон степенного упрочнения в форме

$$\sigma_k = K \cdot e_k^n, \quad (2.48)$$

где K, n – константы материала, подставим соответствующие значения величин из формул (2.48) и (2.47) в правую часть формулы (2.46).

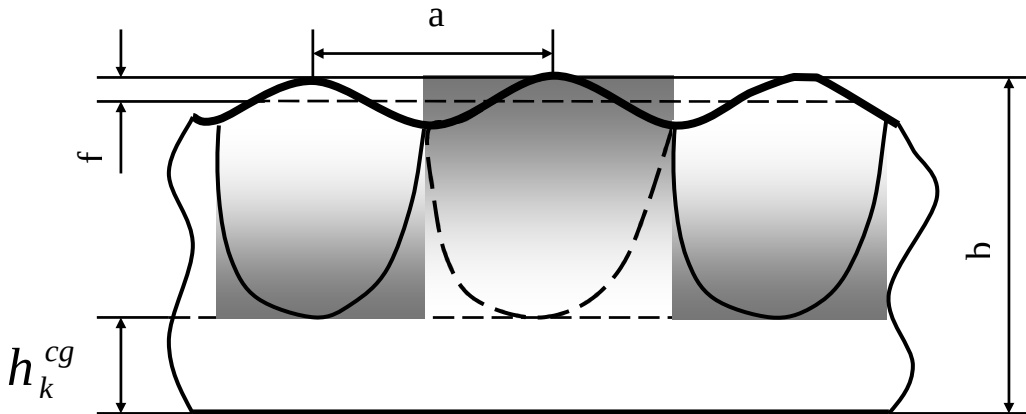


Рис. 2.17. Кромковая волнистость и ее параметры

Несложные преобразования приводят к выражению критической деформации полков:

$$e_k^{cr} = \left[(k^* \cdot \lambda)^2 \cdot \frac{n \cdot E}{K} \cdot \left(\frac{s}{H_k - h_k^{cg}} \right)^4 \right]^{\frac{1}{n+1}}, \quad (2.49)$$

где $\lambda = \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)}.$

Надлежит отметить, что условие (2.49) дает выражение предельной деформации в закритической области, а потому $\mu = 0,5$. Коэффициент, учитывающий условия закрепления краев пластин-полков (один край зашпелен, другой – свободен), принято брать равным 1,277 [155], хотя некоторые авторы считают, что в закритической области значение этого коэффициента должно быть несколько выше (см., например, классический учебник Работнова Ю.Н. [157]). В данной работе принято среднее значение k по работам [155] и [157].

В случае потери устойчивости полки волнистость кромки (см. рис. 2.17) может быть описана в терминах отклонений $w(r, z)$ материальных частиц периферийных участков полки от плоскости пластически недеформированных участков по закону [158, 154]:

$$w(r, z) = f \cdot \frac{r - h_k^{cg}}{b - h_k^{cg}} \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot z}{a}, \quad (2.50)$$

где f – амплитуда волны на кромке, мм; r – текущая координата вдоль прямой, лежащей в плоскости полки и перпендикулярная линии профилирования, мм; m – число полуволи при потере устойчивости; z – текущая координата в направлении движения профиля ($z = x_3$), мм.

При потере устойчивости полки ее продольная деформация может быть подсчитана в последствии, если измерить амплитуду и шаг волны на кромке. В этом случае в формуле (2.50) следует положить $r = b$ и $m = 2$, а затем с использованием функции $w(r, z)$ произвести спрямление волны.

Спрявление синусоиды после несложных, но громоздких вычислений, приводит к следующему выражению:

$$J = \frac{2 \cdot a}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{a} \right)^2} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, p\right), \quad (2.51)$$

где J – длина синусоиды на ее периоде; $E(\pi/2, p)$ – эллиптический интеграл второго рода при $0 < p^2 < 1$.

В формуле (2.51) параметр p определяется соотношением:

$$p = \sqrt{\frac{2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}{a^2 + 2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}}.$$

Зависимость продольной деформации кромки $\varepsilon_{кв}$, вычисленной на основе выражения (2.51), от амплитуды и шага волны представлена на рис. 2.18 в

результате расчетов в среде MathCAD2001Pro. Значение остаточной продольной деформации, представленной на рис. 2.18, задавали соотношением:

$$e_{кв} = \ln\left(\frac{J}{a}\right) \cdot 100\% . \quad (2.52)$$

где J определяется формулой (2.51). Как видно из рис. 2.18, остаточная деформация не зависит от ширины полки и угла подгибки, что обусловлено процедурой расчета, основанной на измерении геометрических параметров волны.

Уравнение (2.50) достаточно хорошо согласуется с данными геометрических замеров при изготовлении швеллерных, корытных и С – образных профилей [58, 137, 138, 154], периферийные элементы которых подвергались локальной потере устойчивости (см. рис. 2.17). Формула (2.52) может использоваться как верхняя оценка критических деформаций подгибаемых полок профиля.

Сопоставление приобретенной деформации полки e_k^f (формула (2.38)) и критической деформации e_k^c (формула (2.49)) позволяет сформулировать критерий возникновения кромковой волнистости в следующем виде [154]:

$$I(\xi) = \begin{cases} 0, & \text{при } \xi < 1 \\ 1, & \text{при } \xi \geq 1 \end{cases}, \quad (2.53)$$

где $I(\xi)$ – индикаторная функция; ξ – отношение остаточной деформации полки к критической деформации (формула (2.49)), приводящей к локальной потере устойчивости полки по выходу профиля из роликового калибра.

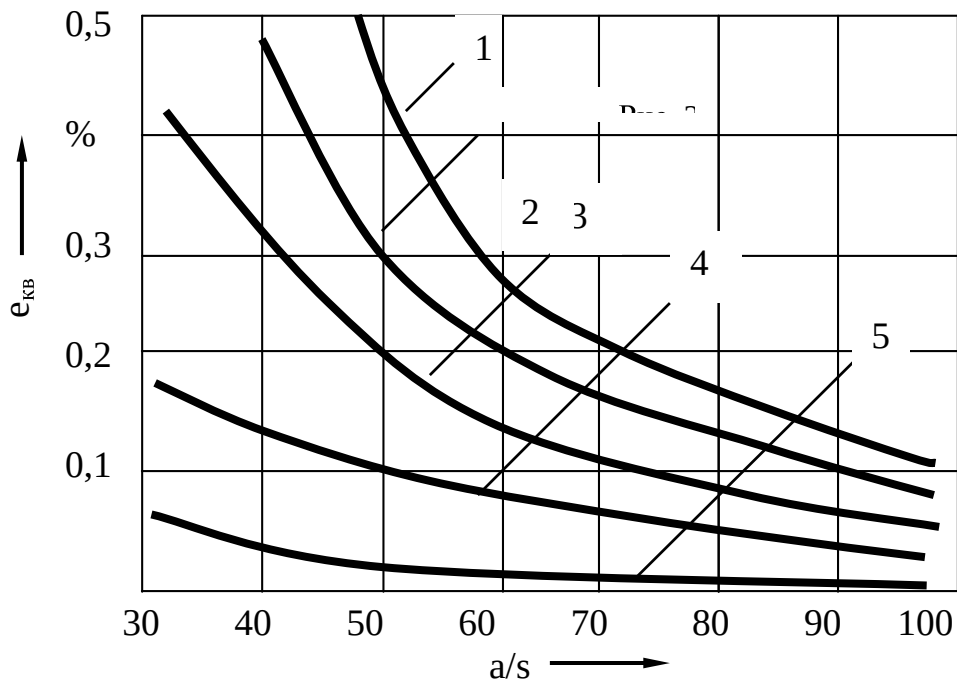


Рис. 2.18. Зависимость остаточной деформации на кромке от относительного шага a/s и амплитуды волны f при потере устойчивости: 1 – $f = 1,0$ мм; 2 – $f = 0,8$ мм; 3 – $f = 0,6$ мм; 4 – $f = 0,4$ мм; 5 – $f = 0,2$ мм

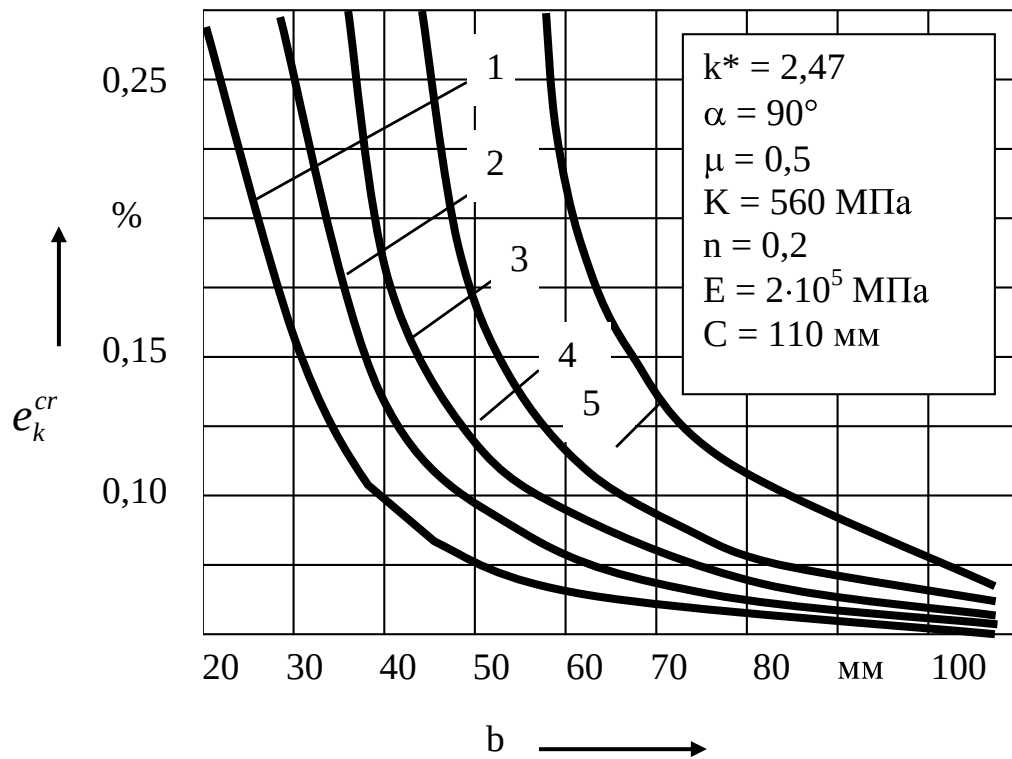


Рис. 2.19. Зависимость критической деформации от ширины полки и толщины стенок профиля: 1 – $s_0 = 0,6$ мм; 2 – $s_0 = 0,8$ мм; 3 – $s_0 = 1,0$ мм; 4 – $s_0 = 1,2$ мм; 5 – $s_0 = 1,5$ мм

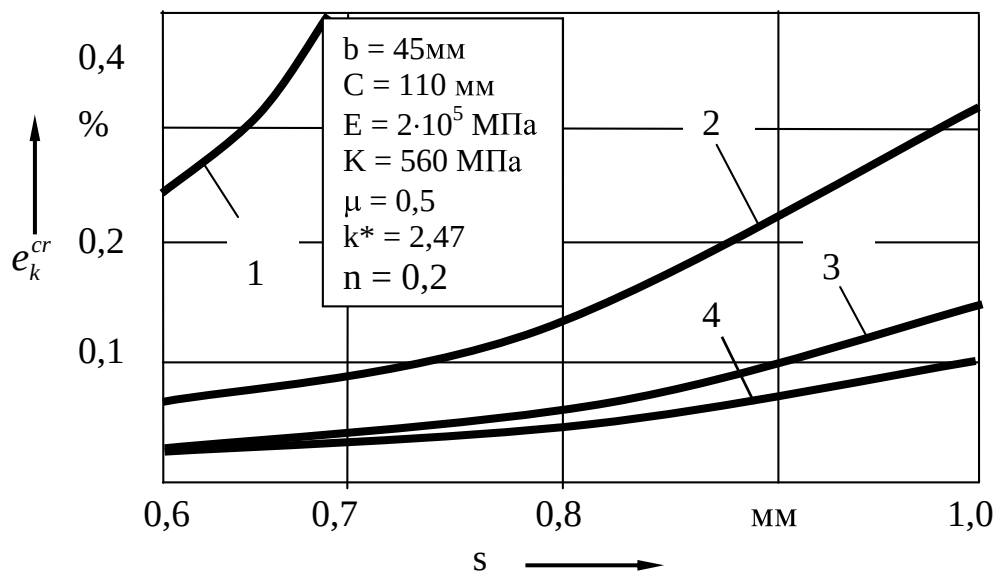


Рис. 2.20. Зависимость критических деформаций полок от толщины заготовки и текущего суммарного угла подгибки:
 1, 2, 3, 4 – $\alpha = 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 90^\circ$ соответственно

В формуле (2.53) индексация переходов условно опущена. Индикаторная функция может быть интерпретирована следующим образом: при $I(\xi) = 0$ кромковая волнистость отсутствует; при $I(\xi) = 1$ кромковая волнистость возникает. Функция (2.53) введена по аналогии с известной дельта-функцией Дирака в квантовой теории поля, однако способ ее задания существенно иной.

На рис. 2.21 изображены графики приобретаемых пластических деформаций полка e_k^f на основе формулы (2.38) и критических деформаций, приводящих к локальной потере устойчивости, в соответствии с формулой (2.49) для

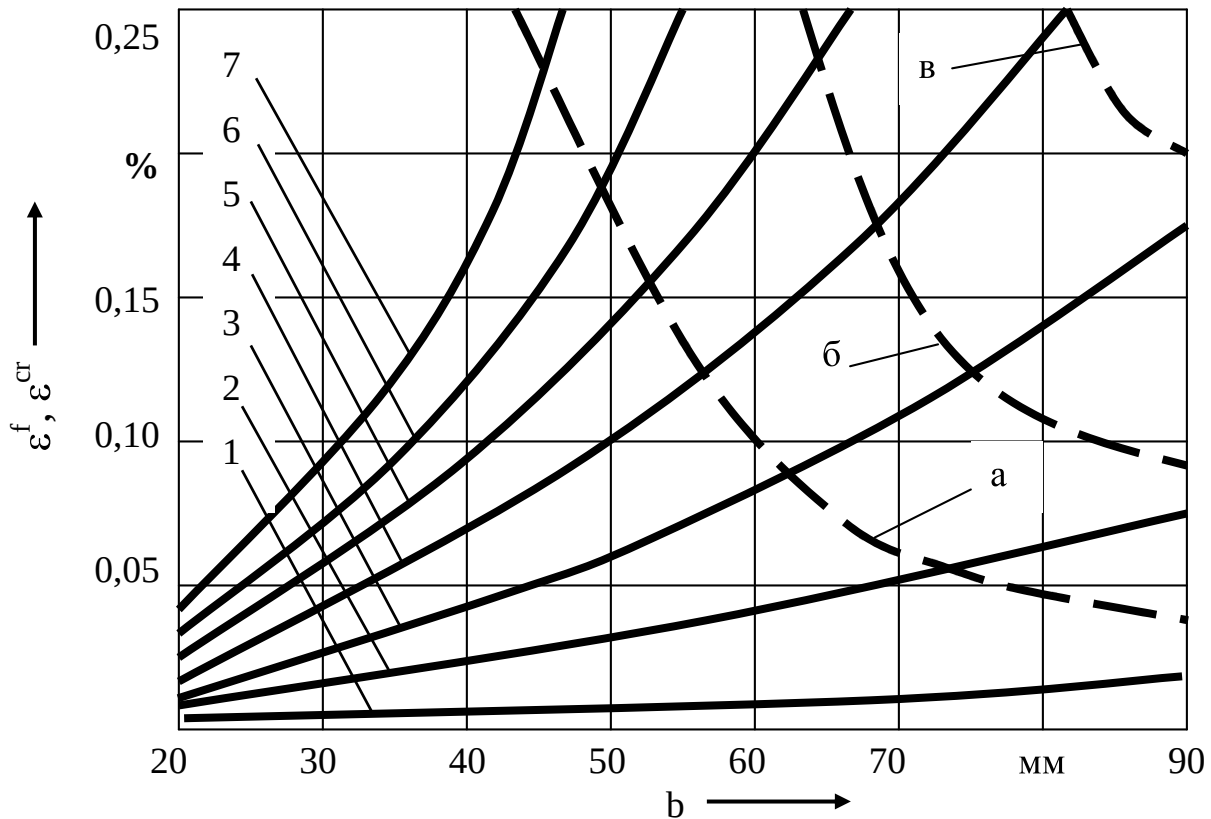


Рис. 2.21. Деформации на первом переходе: — — — приобретенные: 1 — $\theta = 5^\circ$; 2 — $\theta = 10^\circ$; 3 — $\theta = 15^\circ$; 4 — $\theta = 20^\circ$; 5 — $\theta = 25^\circ$; 6 — $\theta = 30^\circ$; 7 — $\theta = 35^\circ$; — — — критические: а — $S = 0,6$ мм; б — $S = 0,8$ мм; в — $S = 1,0$ мм

первого перехода. Единичные значения индикаторной функции на этом графике представляются точками пересечения графиков двух семейств, причем, область допустимых деформаций располагается ниже соответствующей точки. По графику рис. 2.21 можно определить и предельно допустимые углы подгибки полки профиля в первом переходе. Аналогичные графики могут быть построены и для других переходов. Например, для последнего перехода условия потери устойчивости представлены на рис. 2.22. Из сравнения рис. 2.21 и рис. 2.22 видно, что предельные деформации во втором случае существенно ниже. Данное обстоятельство объясняется, с одной стороны, увеличением значения (N_k —

h_k) в знаменателе формулы (2.49), а с другой, уменьшением «эффекта ослабления» углов подгибки в связи с повышением жесткости поперечного сечения заготовки к последнему переходу. Полученные модели используются при разработке технологии производства швеллерных профилей в четвертом разделе на-

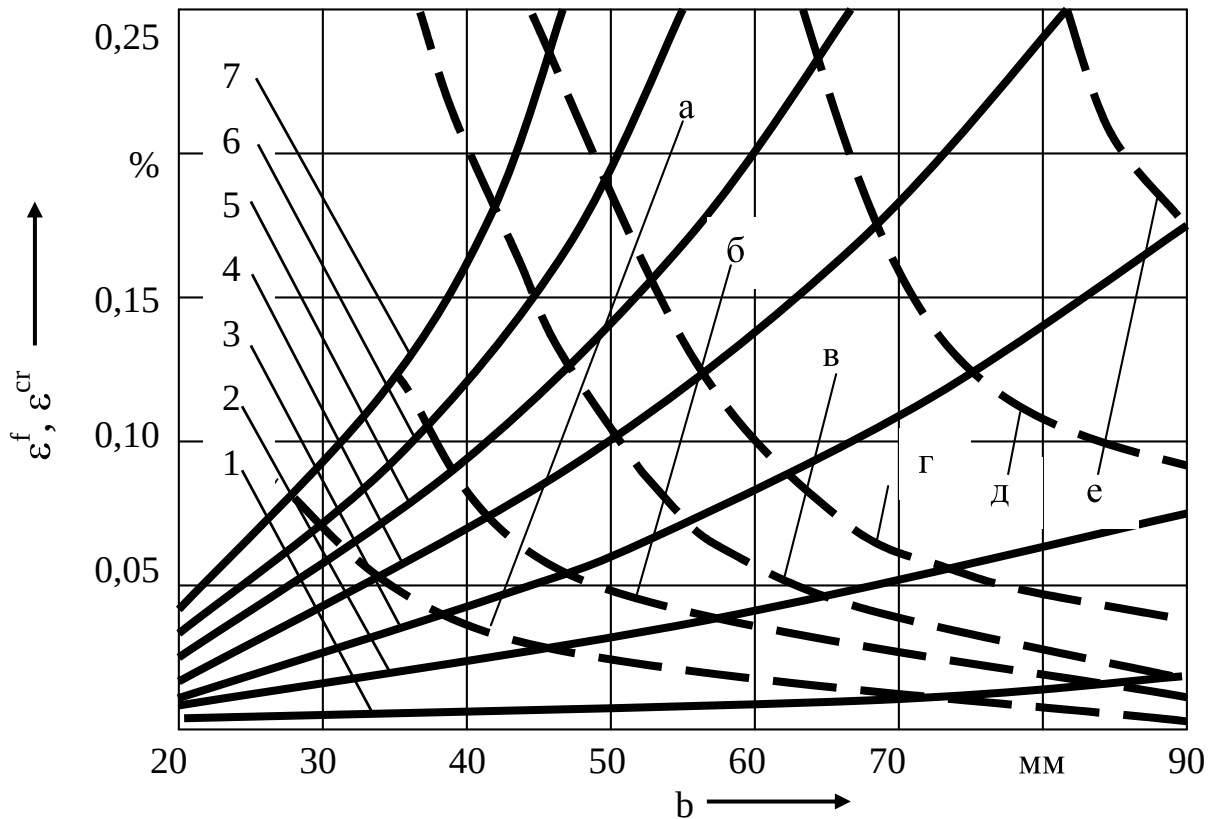


Рис. 2.22. Деформации на последнем переходе: — — — — — приобретенные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ соответственно; — — — — — критические: а, б, в, г, д, е — $S = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$ мм соответственно

стоящей работы. При ориентировочно заданном числе переходов (см. подраздел 2.7) назначают углы подгибки в соответствии с рис. 2.11 или на основе решения соответствующей системы уравнений, проверяя затем по значению индикаторной функции (2.53) приемлемость назначенного угла подгибки для каждого из переходов. При значении индикаторной функции, равном единице хотя бы в одном из переходов, число переходов увеличивают на единицу и итерационную процедуру ведут до достижения такого результата, когда значения индикаторной функции для всех переходов равны нулю. Результат расчета гарантирует равномерность распределения деформаций полок по переходам и отсутствие кромковой волнистости в процессе формообразования профиля.

На практике иногда оказывается, что критерий потери устойчивости не может быть выполнен для всех переходов. Этому случаю соответствуют ситуация, когда на станке с заведомо недостаточным числом клеток (для принятой процедуры проектирования и заданного типа профиля) необходимо, тем не менее, изготовить данный профиль. В этом случае процесс нуждается в корректи-

ровке: с переходов, где возможна кромковая волнистость, снимают по $(1 - 1,5)^\circ$ с углов подгибки и добавляют их в один из переходов, после которого устанавливают межклетьевые проводки. Применение межклетьевых проводок хотя и решает проблему, однако усложняет процесс настройки станка и отладки технологии.

2.7. Число переходов при интенсивном деформировании

При разработке технологии производства гнутых профилей в роликах возникают два важных вопроса: 1) о возможности переноса закономерностей деформирования профилей одних типоразмеров на профили других типоразмеров; 2) об определении потребного числа переходов для производства профиля заданного типоразмера [159].

Первый вопрос связан с проблемой подобия в профилировании, затронутой в работе [159]. Вторым вопросом решается обычно на основании предшествующего опыта разработчиков и зачастую указывается лишь достаточно широкий диапазон значений числа переходов для профилей определенного типа. Это существенно усложняет формализацию процесса проектирования технологической оснастки для формообразования профиля в роликах. В разделе 1.5.5 рассмотрены различные подходы к определению числа переходов [146, 147], а также их недостатки.

Рассмотрению подлежат уголкового, швеллерные, корытные и С – образные профили с толщиной стенки до 1,5 мм. В работе [155] предпринята попытка построения зависимости числа переходов от геометрических параметров профиля и характеристик применяемого оборудования для вышеуказанных типов профилей в виде:

$$N = K \cdot C_{rf}, \quad (2.54)$$

где N – число переходов; K – коэффициент идентификации типа профиля; C_{rf} – критерий подобия.

Критерий подобия в формуле (2.54) учитывал геометрию сечения профиля и параметры оборудования. Хотя в целом модель дала неплохие результаты в процессе тестирования, однако введение конструктивного ограничения на радиусыгиба, назначение самого коэффициента формы из условий осреднения его значений по группам однотипных профилей вызывает определенно неудовлетворение. Кроме того, предложенный критерий подобия работает удовлетворительно лишь в весьма узком диапазоне геометрических параметров сечения профиля и не в полной мере отвечает требованию мультипликативности параметров [160]. Преимуществом этой модели перед моделью работы [147] было включение ряда дополнительных факторов: угла и радиусагиба, толщины заготовки, характеристик оборудования и оснастки. Коэффициент формы был безразмерным в отличие от модели Киути [147], где он имел размерность площади или длины в зависимости от типа профиля. Впрочем, различие технологии и

применяемого оборудования в этих двух моделях не допускает взаимный перенос результатов.

С учетом указанных недостатков разработана новая полуэмпирическая модель для определения числа переходов:

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos \alpha)}{L_M \cdot n} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_g \cdot s}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.55)$$

где F – функция формы; L_M – межклетьеовое расстояние профилегибочного станка, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм; α – суммарный угол подгибки боковых полок, град; C – ширина дна профиля, мм; R – средний радиусгиба, соответствующий 95% уровню охвата зоны сгиба пластическими деформациями, мм; r_g – внутренний радиус зоны сгиба, мм; s – толщина заготовки, мм; n – число зон сгиба профиля.

Функция (2.55) построена на основе статистического анализа выборок из журналов технологической отработки 13 уголкового, 51 швеллерного, 62 корытных и 77 С – образных профилей (отбор представительных конфигураций производился на основе базы данных, включающей более 500 типоразмеров гнутых профилей). Анализ проводился на основе частных параметрических моделей по каждому типоразмеру с последующей гибридизацией результатов. Выборки включали профили с диапазонами геометрических параметров сечения профиля и применяемого оборудования, приведенными в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Диапазоны варьирования параметров в выборках

	Наименование параметра, его размерность	Диапазон изменения	Примечания
	b , мм	20 – 60	
	C , мм	28 – 210	
	g , мм	5 – 30	
	s , мм	0,5 – 1,5	
	r , мм	0,6 – 2,0	
	α , град.	75 – 90	
	L_M , мм	220 – 600	Станки: ГПС-200М ($L_M = 220$ мм); ГПС-300М6 ($L_M = 400$ мм); ГПС-500М8 ($L_M = 400$ мм).

В формуле (2.55) первый сомножитель в квадратных скобках отражает влияние формы дна заготовки профиля, второй – степень «стеснения» заготовки, третий – жесткость угловой зоны. Функция формы F определяется соотношением:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{A}{A'}, \quad (2.56)$$

где A – площадь фигуры, охватываемой контуром сечения профиля и линией соединения кромок, мм^2 ; A' – площадь фигуры, построенной на отрезке дна профиля и отрезке, соединяющем кромки профиля, мм^2 .

Рис. 2.23 дает представление об определении площадей A и A' для четырех типов профилей. Для тех же типов профилей функцию формы можно задать единой обобщенной формулой:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{C + b \cdot \cos \alpha}{C + b \cdot \cos \alpha \pm g}, \quad (2.57)$$

где g – ширина горизонтальных полок профиля, мм , причем, знак «+» относится к профилю корытного типа, а знак «–» – к С-образному профилю.

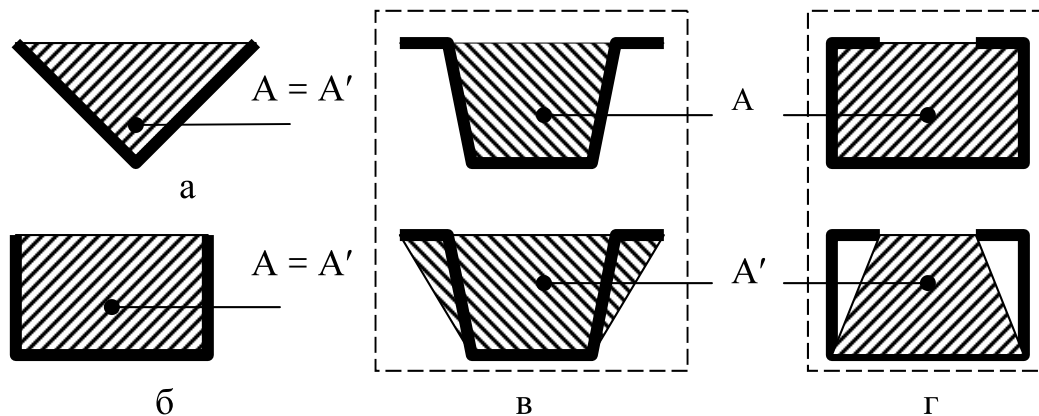


Рис. 2.23. К определению площадей фигур для вычисления функции формы:
а – уголкового профиля; б – швеллерный профиль; в – корытный профиль;
г – С-образный профиль

В формуле (2.57) коэффициент 3,2 получен калибровкой формулы (2.55) на массиве экспериментальных данных при сквозной прогонке модели по ширине полки. Функции формы для профилей различных конфигураций, построенные на основе формулы (2.57), изображены на рис. 2.24.

Обработку результатов, анализ и тестирование модели проводили в среде MathCAD – 2001 Pro. Результаты тестирования показали, что с увеличением ширины полки увеличение межклетьевого расстояния приводит к уменьшению числа переходов от 0,3 до 1 при изменении ширины полки от 20 до 90 мм при фиксированных значениях других параметров в пределах диапазона, определяемого табл. 2.2. Влияние суммарного углагиба примерно в полтора раза слабее в сравнении с предыдущим случаем. Для более наглядной иллюстрации подобных соотношений на рис. 2.25 и рис. 2.26 приведены зависимости числа переходов от толщины заготовки и ширины дна соответственно при изменении величины «b» в пределах всего диапазона. Характер графиков с ростом «b» имеет тенденцию к увеличению и последующей стагнации, что соответствует данным производственного опыта. При случайной выборке в объеме 25 % от исходной, различие предсказанного и практического значения числа переходов не превышало 0,4. Расчет числа переходов для 6 профилей с шириной полок

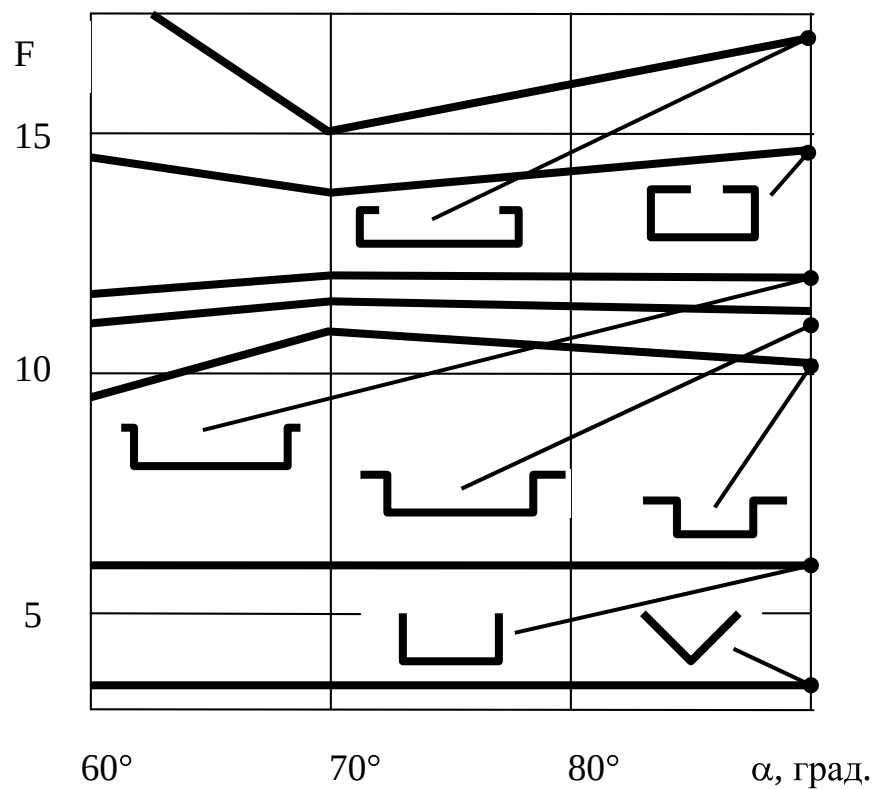


Рис. 2.24. Значения функции формы профиля

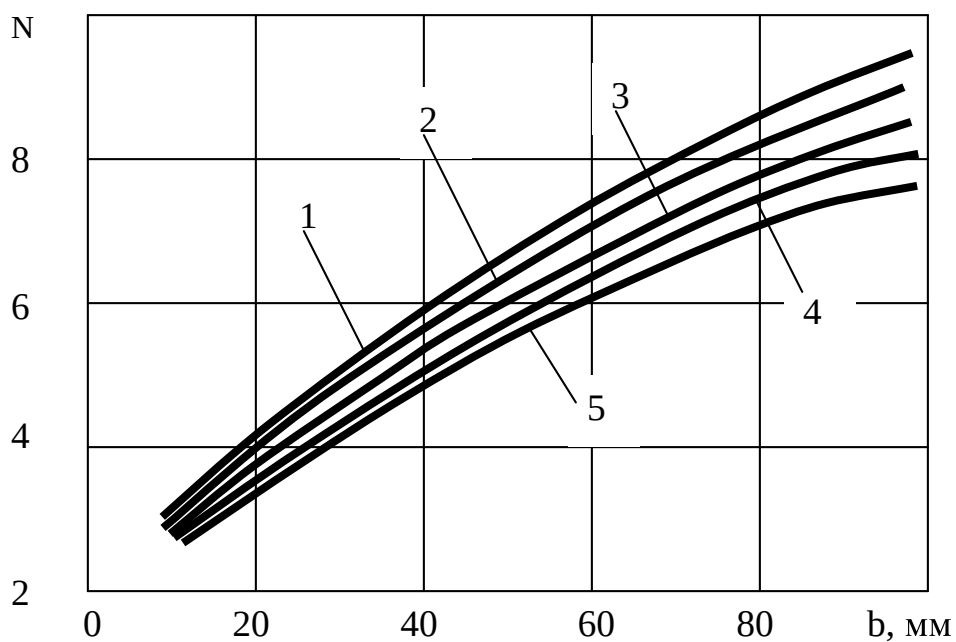


Рис. 2.25. Зависимость числа переходов при изготовлении швеллерного профиля от ширины полки и толщины заготовки:

1, 2, 3, 4, 5 – $s = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$ мм соответственно; $r = 0,6$ мм;
 $R = 5$ мм; $L = 400$ мм; $C = 100$ мм

более 60 мм показал, что ошибка в определении N не превышала величины 0,6 в сравнении с производственными результатами. Это означает, что построенная

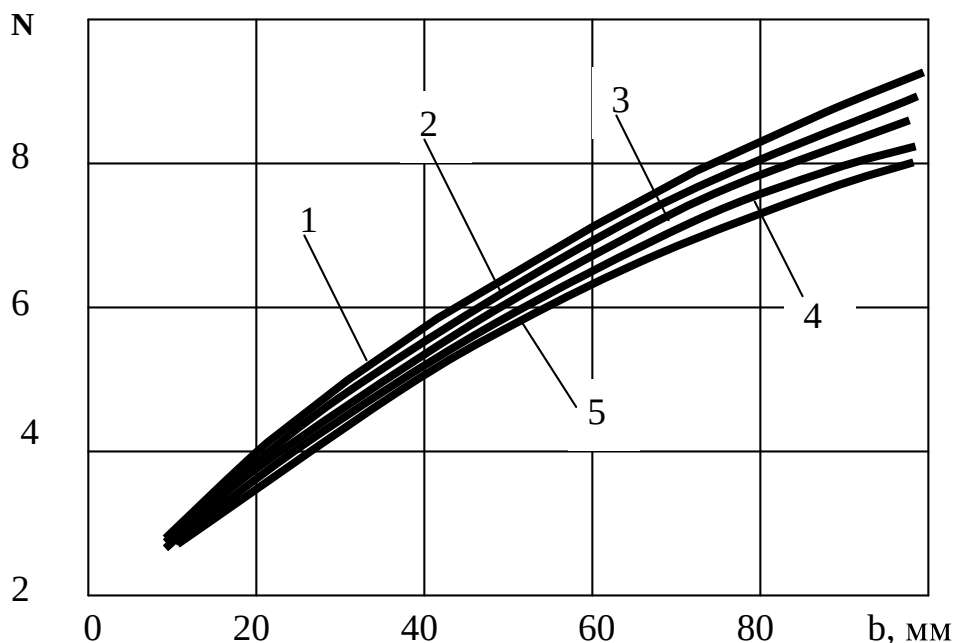


Рис. 2.26. Зависимость числа переходов при изготовлении швеллерного профиля от ширины подгибаемой полки и ширины дна профиля: 1, 2, 3, 4, 5 – $C = 30; 60; 90; 145; 210$ мм соответственно; $r = 1,0$ мм; $R = 5$ мм; $L = 400$ мм; $s = 0,6$ мм

модель (с учетом округления числа переходов преимущественно в сторону увеличения) может применяться для прогнозирования за пределами диапазона параметров табл. 2.2, однако с известной долей осторожности. К сожалению, модель явным образом не содержит критерии ограничений, а потому при разработке технологии производства профилей с параметрами, выходящими за пределы диапазонов табл. 2.2, значение числа переходов подлежит уточнению с использованием, например, критерия локальной потери устойчивости элементов профиля (см. раздел 4 настоящей работы).

2.8. Эффекты влияния ширины донной части профиля

Изготовление профилей с широким дном преимущественно с покрытием в роликах на гибочно-прокатных станках при мелкосерийном характере производства связано с возникновением потери устойчивости подгибаемых полок вследствие интенсификации процесса профилирования из-за ограниченного числа клеток станков [141]. Большие углы подгибки полок за один переход приводят к относительно большим степеням деформаций подгибаемых полок, зависящим в значительной степени от размеров поперечного сечения профиля и параметров процесса его формообразования. Замечено, что формообразование профилей с продольными рифтами в донной части чаще приводит к потере устойчивости, чем формообразование профилей с гладким дном при прочих равных условиях.

Приложение момента сил к подгибаемой полке со стороны конических участков нижнего формирующего ролика (рис. 2.13) вызывает не только резкое изменение кривизны подгибаемой полки непосредственно перед входом в калибр, но и ряд других эффектов: кручение полки, поворот угловых элементов, выпучивание донной части заготовки, продольный прогиб заготовки в межклетьевом пространстве. Указанные эффекты до настоящего времени не получили систематического изучения, за исключением работы [58], где приведены экспериментальные данные по профилям с толщиной стенки 2...4 мм, освещающие геометрическую сторону дела без существенного анализа причин их возникновения. Данное обстоятельство объясняется слабой выраженностью обсуждаемых эффектов для толстостенных профилей с небольшой шириной подгибаемых полок (до 30 толщин материала заготовки), изготавливаемых на станках с достаточно большим числом задействованных клеток при режимах подгибки 5...10 градусов за переход.

С точки зрения технологии мелкосерийного производства указанные выше эффекты являются весьма значимыми для оптимизации процесса профилирования заготовки, поскольку, как будет показано ниже, имеется ряд возможностей влияния на проявления упомянутых эффектов.

Рассмотрим указанные выше три первых эффекта как наиболее важные, приняв следующие допущения:

- материал заготовки принимается квазиизотропным в упругой области и дискретно (по переходам) упрочняющимся в контактной зоне;
- продольный прогиб заготовки в межклетьевом пространстве не оказывает существенного влияния на другие эффекты ввиду его малости, так что угловые зоны можно считать подкрепляющими ребрами, являющимися абсолютно жесткими на изгиб в направлении нормали к плоскости дна профиля и имеющими малую жесткость в плоскостях, касательных к срединной поверхности;
- передняя граница (в осевой плоскости текущего перехода) и задняя граница (начало зоны плавного перехода) выпученной донной части заготовки могут перемещаться только в горизонтальной плоскости;
- зона выпучивания донной части заготовки простирается на длину зоны плавного перехода;
- участки приложения момента кручения свободной уголкового профиля и момента, преодолевающего сопротивление уголкового пластического шарнира в контактной зоне, считаются совпадающими.

Межклетьевое пространство, предшествующее, например, k -ому переходу, может быть разделено на три зоны: зона стабилизации по выходу из предшествующего калибра L_{st}^k , зона плавного перехода L^k , контактная зона L_{con}^k (рис. 2.13). Далее рассматривается зона проявления указанных выше эффектов протяженностью L^k (рис. 2.27). Используем условие равновесия для момента

сил относительно оси X_3 , аналогичное интегральному условию равновесия согласно работе [134]:

$$\int_A [\vec{r} \cdot \vec{\sigma}^n]_{x_3} \cdot dA = 0, \Rightarrow \sum_{i=1}^n M_{x_3}^i = 0 \quad (2.58)$$

где $\vec{r}$ – радиус вектор; $\vec{\sigma}^n$ – вектор напряжений; A – площадь поверхности выделенной части заготовки; $M_{x_3}^i$ – момент, соответствующий состоянию деформирования рассматриваемого элемента.

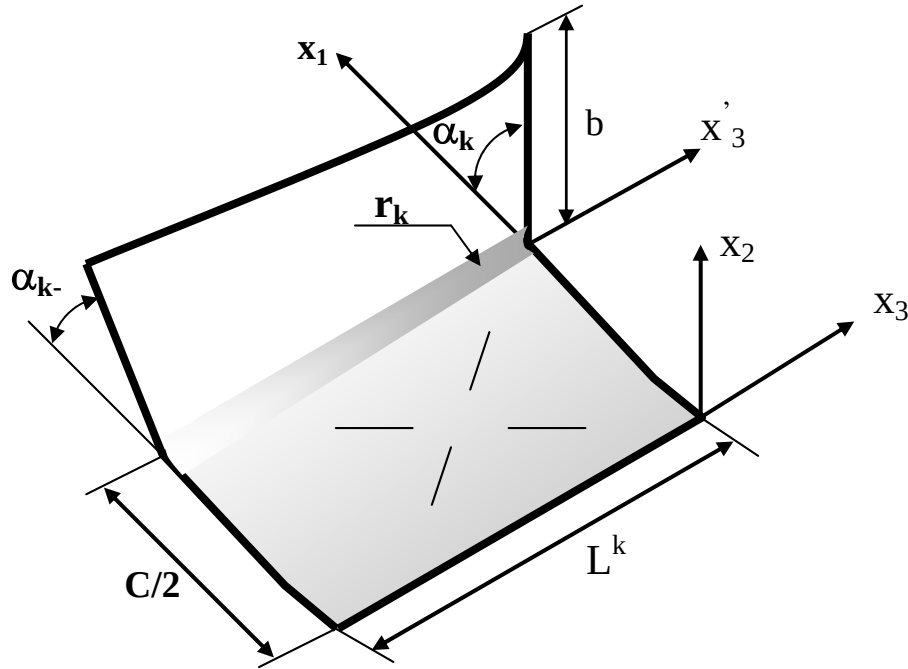


Рис. 2.27. Зона прогиба в межклетьевом пространстве

В контактной зоне k -го перехода подгибаемая полка прилегает к части конической поверхности нижнего формующего ролика, деформируясь, и воздействует на зону плавного перехода L^k , вызывая эффекты деформирования полки и кручения уголковой зоны (ребра жесткости), а также прогиб донной части изготавливаемого профиля.

Опуская индексацию оси и вводя специальные обозначения для моментов внешних сил, условие (2.58) может быть представлено в следующем виде:

$$M_L^k - M_{ft}^k - M_{at}^k - M_b^k = 0, \quad (2.59)$$

где M_L^k – момент от перерезывающих сил в контактной зоне

M_{ft}^k – момент силы сопротивления деформированию полки;

M_{at}^k – момент силы сопротивления кручению уголковой зоны;

M_b^k – момент силы деформирования донной части профиля.

Момент M_L^k вычисляется на основе решения задачи деформирования заготовки в контактной зоне и представляется в следующем виде:

$$M_L^k = \frac{\sigma_s \cdot s_0 \cdot (e_{k-1}^\Sigma)^n \cdot \gamma}{2 \cdot z_k \cdot \sin^2(\alpha_k)} \cdot \left[\frac{(1 + z_k)}{(z_k + 2)} \cdot \frac{[(R_f^k)^{z_k+2} - (R_0^k)^{z_k+2}]}{(R_f^k)^{z_k}} \right] - \sin^2(\alpha_k) \cdot \frac{b^2}{2} - R_f^k \cdot \frac{[(R_f^k)^{z_k+1} - (R_0^k)^{z_k+1}]}{(R_f^k)^{z_k}}, \quad (2.60)$$

где σ_s, n - характеристики материала заготовки; α_k - суммарный угол подгибки на k -ом переходе; R_0^k - радиус формирующего ролика под базовым элементом (донной частью профиля); b, s_0 - ширина подгибаемой полки и ее толщина соответственно; α_k - угол контактной зоны; e_{k-1}^Σ - суммарная интенсивность логарифмических деформаций полки, приобретенных на предшествующих переходах.

Здесь $R_f^k = R_0^k + b \cdot \sin \alpha_k$, а фактор z_k определяется соотношением:

$$z_k = v \cdot \operatorname{ctg} \alpha_k,$$

где v - коэффициент трения между заготовкой и поверхностью формирующего ролика.

В формуле (2.60) γ является функцией коэффициентов анизотропии в соответствии с работой [134].

Момент силы сопротивления деформированию полки может быть определен на основе работы [141]:

$$M_{ft}^k = \frac{\sigma_2 \cdot s_0 \cdot b^3}{6} \cdot \left[\frac{d\theta_k}{dx_3} \right]^2 \cdot L^k \cdot (e_{k-1}^\Sigma)^n, \quad (2.61)$$

где θ_k - текущее значение угла подгибки в зоне плавного перехода; x_3 - декартова координата, совпадающая с осью профилирования.

Надлежит отметить, что момент M_{ft}^k нельзя вычислять на основе моделей упругого кручения, поскольку их применимость для диапазонов $b=20...70$ мм при $s_0 = 1$ мм, $\theta_k = 15^\circ$ для малоуглеродистых сталей дает предельное значение угла упругого кручения порядка 2° .

Для выявления характера влияния эффекта подгибки полок на прогиб донной части профиля, принимая во внимание последнее из сформулированных выше допущений, будем рассматривать участок базового элемента профиля (дно профиля) с размерами $L^k \times C$ в направлении координатных осей x_3 и x_1 соответственно. В дополнение к исходным допущениям примем, что при установившемся режиме профилирования кривизны донной части заготовки в продольном и поперечном направлениях постоянны.

Поскольку прогиб донной части ω не превышает $C/5$, то она может рассматриваться как пологая оболочка, для которой основные уравнения равновесия и совместности деформаций представляются в форме, предложенной Маргерром [161]:

$$\frac{\mathbf{D}}{s_0} \cdot \nabla^4 \omega = \Re(\Phi, \omega) + \frac{8 \cdot \mathbf{M}_b^k}{\mathbf{L}^k \cdot C^2 \cdot s_0};$$

$$\frac{\nabla^4 \Phi}{E} = -\Re \left[(\omega - \omega_0), \frac{1}{2}(\omega + \omega_0) \right]. \quad (2.62)$$

где $\mathbf{D}$ – цилиндрическая жесткость оболочечного элемента; ω – текущий прогиб оболочки; Φ – функция напряжений; $\Re$ – дифференциальный оператор; ω_0 – максимальный прогиб оболочки; E – модуль Юнга материала.

Граничные условия для краев оболочки вдоль координатных осей x_3 и x_1 задаются в виде:

$$\omega = 0, \quad \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_3^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} = 0, \quad \sigma_3 = \sigma_1 = 0, \quad \tau_{13} = \tau_{31} = 0. \quad (2.63)$$

Для решения уравнений (2.62) с граничными условиями (2.63) применим метод Бубнова – Галеркина с использованием аппроксимирующих функций, зависящих от преобразованных координат x_1' , x_3' :

$$\omega = \omega_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi x_3'}{L^k}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi x_1'}{C}\right), \quad \Phi = A \cdot \sin\left(\frac{\pi x_3'}{L^k}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi x_1'}{C}\right), \quad (2.64)$$

где A – амплитудное значение функции напряжений.

Отметим, что координатная привязка аппроксимирующих функций (2.64) условна: в формулах (2.64) систему координат следует считать локальной, привязанной к одному из углов выпученной части дна профиля (рис. 2.27). При необходимости переход в основную систему координат легко осуществляется с помощью соответствующих линейных преобразований координат.

Переходя к безразмерным параметрам, получим значения изгибающих моментов, действующих со стороны уголкового зоны на донную часть профиля:

$$\mathbf{M}_b^k = \frac{E \cdot s_0^4}{8 \cdot L^k} \cdot \left\{ \frac{32 \cdot \pi^2 \cdot \zeta^3}{9 \cdot (1 + 1/\lambda)^2} - \frac{\kappa \cdot \pi^2 \cdot \zeta^2}{(1 + 1/\lambda)^2} + \frac{1}{16} \left[\frac{\kappa^2 \cdot \pi^2 \cdot \zeta^2}{(1 + 1/\lambda)^2} + \frac{\pi^6 \cdot (1/\lambda + \lambda)^2}{192 \cdot (1 - \mu^2)} \right] \cdot \zeta \right\}, \quad (2.65)$$

где κ – приведенная кривизна донной части профиля; ζ – относительный прогиб; λ – отношение протяженности выпученной части дна профиля к ширине его дна C ; μ – коэффициент Пуассона.

Момент сопротивления кручению углового элемента профиля M_{at}^k складывается из момента сопротивления чистому кручению M_e^k и момента сопротивления пластического шарнира M_{pj}^k на участке в непосредственной близости от осевой плоскости ($L_{con} \ll L^k$):

$$M_{at}^k = M_e^k + M_{pj}^k, \quad (2.66)$$

где значения M_e^k и M_{pj}^k определяются зависимостями [165, 161]:

$$M_e^k = G \cdot J^k \cdot \theta_k' / L^k, \quad (2.67)$$

$$M_{pj}^k = \eta \cdot \sigma_2 \cdot s_0 \cdot (r_b^k + s_0 / 2) \cdot \theta_k' \cdot (e_{k-1}^\Sigma)^n \cdot i^k, \quad (2.68)$$

где G – модуль сдвига материала заготовки; J^k, i_k – момент инерции и радиус инерции угловой зоны соответственно, зависящие от радиуса зоны сгиба r_b^k [162]; θ_k' – угол поворота пластического шарнира.

Для проверки выполнения условия (2.59) в среде MathCAD – 2001 Pro были выполнены расчеты с использованием формул (2.60), (2.61), (2.65) – (2.68), причем момент от перерезывающих сил обозначен за M_L , а суммарный момент сопротивления – за M_Σ . Предельный момент, соответствующий изгибу на длине L^k при схеме гибки на кромкогибе с поворотной траверсой обозначен за M_{ult} . Расчеты выполнены для стального профиля с шириной донной части 110 мм, радиусегиба, равном двойной толщине заготовки, при коэффициенте трения 0,2 и угле подгибки около 12° . Расчеты показали (рис. 2.28) удовлетворительное выполнение равенства (2.59) с невязкой в несколько процентов (см. кривые «1» и «2»).

Угол поворота пластического шарнира θ_k' в формуле (2.68) представляет собой угол поворота сечения зоны сгиба β , который, в свою очередь, может быть получен из условия $\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{d\omega}{dx_1} = \operatorname{tg} \beta$ на одном из ребер жесткости в точке,

удаленной от осевой плоскости текущего перехода на величину 2Δ (начало зоны интенсивного деформирования перед роликами). Тогда угол поворота пластического шарнира представляется следующей функцией:

$$\theta_k' = \arctg \left\{ k \cdot \bar{C} \cdot \bar{b} \cdot \pi \cdot \sin \left[\pi \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta}{L^k} \right) \cdot \frac{J_0}{J} \right] \right\}, \quad (2.69)$$

где k – коэффициент эмпирической зависимости прогибов дна профиля от размерных параметров его поперечного сечения; $\bar{C}, \bar{b}$ – относительная ширина донной части профиля и подгибаемой полки; J_0, J – моменты инерции, гладкой полки и полки с элементами жесткости относительно оси, проходящей через центр масс донной части профиля и параллельной координатной оси x_1 , соответственно.

В формуле (2.69) выражение $\left(1 - \frac{2 \cdot \Delta}{L^k}\right) \cdot \frac{J_0}{J}$ соответствует отношению $\frac{x_3}{L^k}$ в формуле (2.64), причем максимальный прогиб ω_0 задан формулой, полученной обработкой эмпирических данных по профилям (табл. 2.4):

$$\omega_0 = k \cdot \left(\frac{C}{s_0}\right)^2 \cdot b. \quad (2.70)$$

Величина Δ в зависимости (2.69) определяется геометрическим соотношением:

$$\Delta = \left\{ \theta_k \cdot \left[2 \cdot R_0^k \cdot b + b^2 \cdot (\sin \alpha_k + \sin(\alpha_k - \theta_k)) \right] \cdot [\sin \alpha_k - \sin(\alpha_k - \theta_k)] \right\}^{1/2}. \quad (2.71)$$

В том случае, когда донная часть заготовки обладает высокой жесткостью (узкий профиль или наличие рифтов на базовом элементе) уголкового участка может переходить в пластическое состояние с изменением радиуса кривизны зоны сгиба на участке перед осевой плоскостью. Оценка протяженности данного участка $\chi(b, s_0, r)$ может быть получена из следующих соображений. Момент сил M_{at}^k имеет своим верхним пределом значение момента при пластическом изгибе (с изменением радиуса сопряжения дна и подгибаемой полки профиля).

Соотнесение указанных моментов определяет протяженность участка с пластическим состоянием уголкового участка:

$$\chi = \frac{4 \cdot M_{at}^k}{\sigma_T \cdot s_0^2}.$$

На основании последнего соотношения с учетом формулы (2.66) и результатов работы [141], для условий рис. 2.28 построены графики протяженности зоны плавного перехода и протяженности пластической уголкового участка (рис. 2.29), откуда видно, что пластическая зона угла не превышает четверти зоны плавного перехода, что также согласуется с результатами экспериментальных исследований других авторов [58].

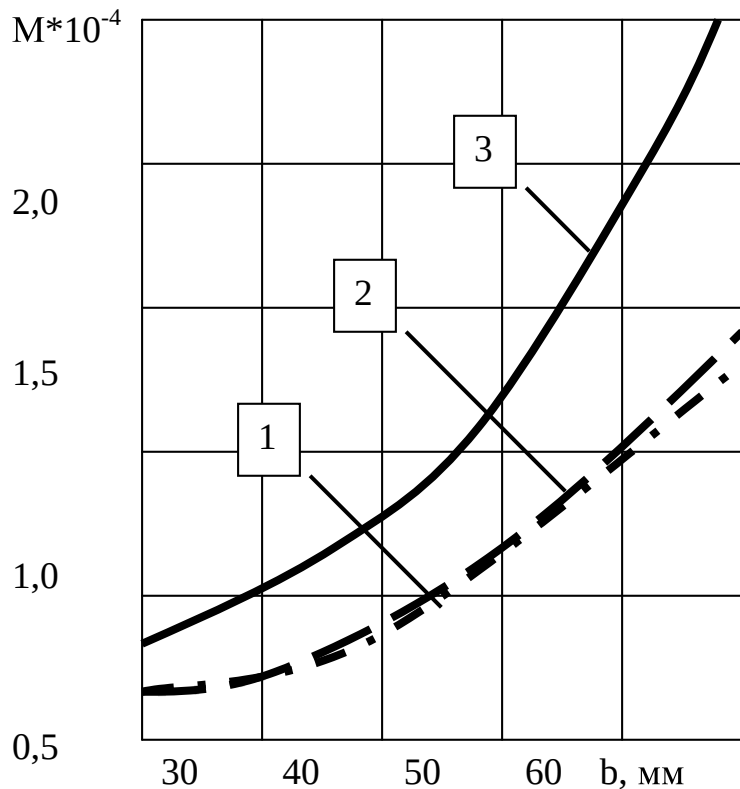


Рис. 2.28. Равенство моментов согласно формуле (2.59): 1 – M_{ult}^k ; 2 – M_L^k ; 3 – M_{Σ}^k

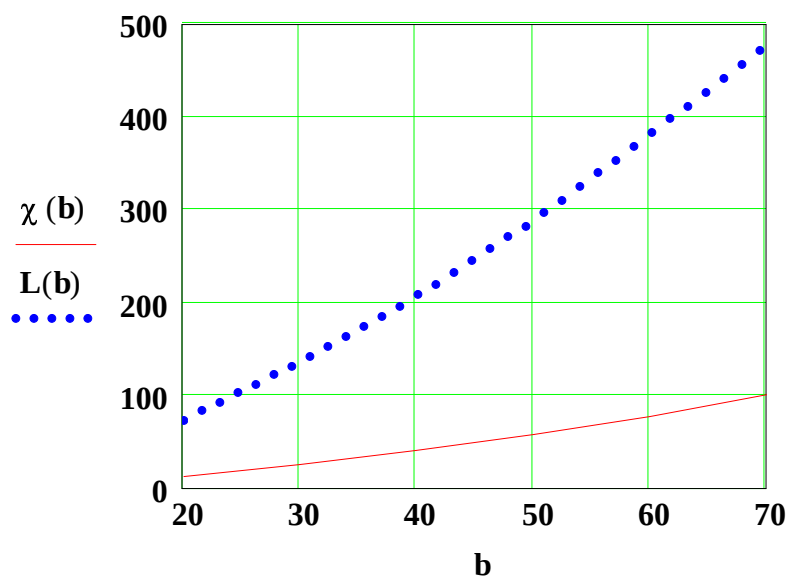


Рис. 2.29. Соотношение протяженности пластической уголкового зоны и зоны плавного перехода

Экспериментальные исследования проводили на промышленном станке ГПС-350М6-с (см. раздел 3) производства ОАО «Ульяновский механический завод».

Исследованию подлежали процессы изготовления профилей швеллерного типа из стали с гальваническим и органическим покрытием. С целью минимизации затрат исследования

проводили *in vivo* при отработке технологии производства профилей для ряда российских предприятий, в том числе ЗАО «ИНСИ» (г. Челябинск), для которого разработано и внедрено в 2001 – 2002 гг. около 50 типоразмеров гнутых профилей. В табл. 2.3 представлена сокращенная номенклатура профилей, подлежащих исследованию.

Таблица 2.3

Типоразмеры профилей для исследования

№ профилей	b, мм	C, мм	Примечания
1-15	30, 45, 60	70, 110, 130, 150, 195	$r_b = 1$ мм; $s_0 = 0,7$ мм
16-32	30, 45, 60, 70	70, 110, 150, 195	$r_b = 2$ мм; $s_0 = 1$ мм

Предметом исследования являлись характеристики прогибов донной части профилей в межклетьевом пространстве по переходам (в данной работе представлены данные только по второму переходу (рис. 2.30)) и условия «смягчения» режимов подгибки за счет прогибов дна профиля. Для измерения прогибов донной части профиля использовали устройство индикаторного типа (ГОСТ 577-68) с диапазоном измерения до 5 мм и точностью 0,01 мм, которое монтировалось на специальной стойке с возможностью продольного перемещения. При отработке технологии проводили замеры и вносили результаты в протоколы исследований. Затем анализировали характер зависимости максимального прогиба от углов подгибки, ширины полки, дна и толщины заготовки. Частные модели получали параболической аппроксимацией данных в среде EXCEL 97 при уровне адекватности 0,99 (см. рис. 2.30). Обобщенные данные исследований прогибов отражают формулы (2.64), (2.69 – 2.70).

Для профилей с шириной стенки 100, 150 и 200 мм, шириной полки 45 мм и толщиной 0,6 мм были проведены исследования, связанные с предварительной накаткой продольного треугольного рифта 20x15 мм в средней части заготовки перед

профилированием с теми же режимами подгибки, что и для аналогичных профилей с гладким дном. При углах подгибки более 30 градусов наблюдалась потеря устойчивости подгибаемых полок перед третьим переходом, а при углах подгибки от 23 до 30 градусов полки теряли устойчивость по выходу профиля из правильного устройства. При этом донная часть имеет характер двустороннего развала, что свидетельствует о значительных нагрузках, приводящих ее в пластическое состояние и о несоответствии режимов условиям благоприятного формообразования.

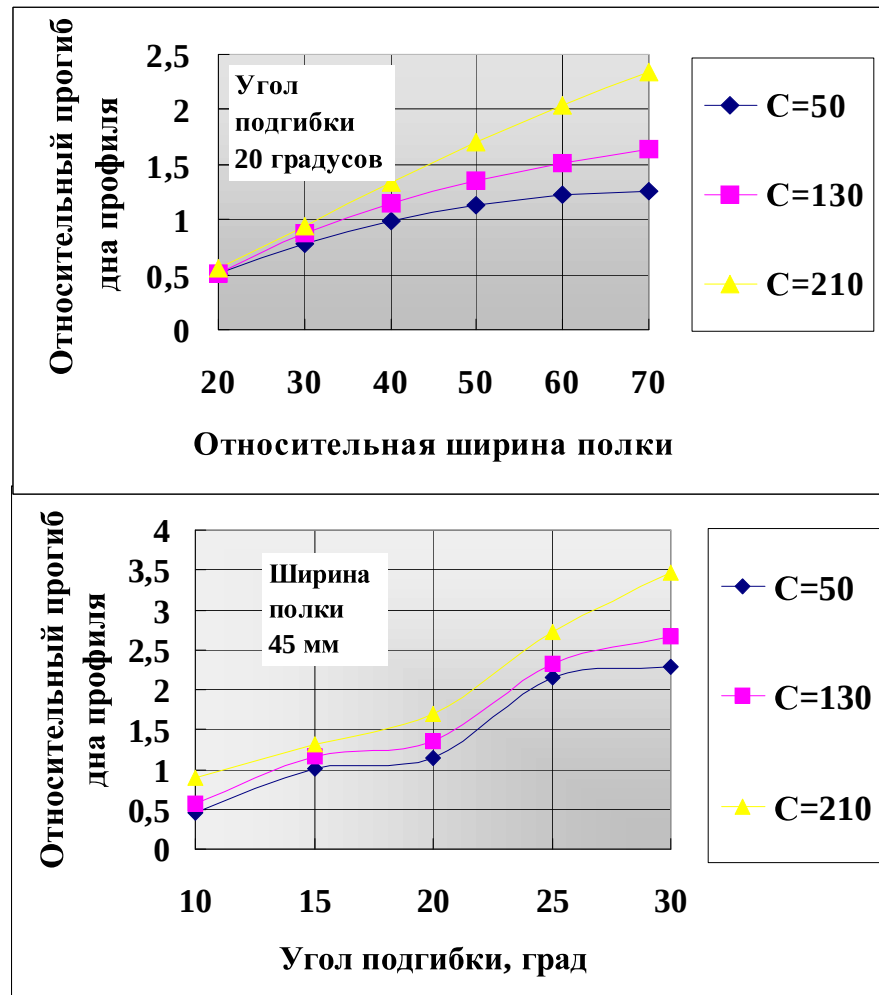


Рис. 2.30. Зависимость прогиба дна профиля от ширины подгибаемой полки и угла подгибки

Отсюда следует, что жесткая донная часть заготовки с рифтами требует менее жестких режимов подгибки, чем гладкое дно профиля. Это означает, что выверенные практикой режимы подгибки, применяемые для профилей с соизмеримыми размерами подгибаемых полок и ширины дна, в применении к формообразованию профилей с широким дном могут быть существенно ужесточены. Фактически реально назначаемый угол подгибки будет «ослаблен» за счет прогиба донной части заготовки.

При проверке адекватности построенной модели в проведенных расчетах параметров заготовки из оцинкованной стали по формуле (2.59) с использованием соотношений (2.60), (2.61) и (2.65 – 2.68) по программе, выполненной в среде MathCAD – 2001, не учтено упрочнение, а в соотношениях (2.61) и (2.68)

принято $\mathbf{n} = \mathbf{0}$ и $\sigma_2 = \sigma_s$. Анизотропией также пренебрегали, полагая все коэффициенты анизотропии равными 0,5 (для пластического состояния). Левую часть уравнения (2.59) представляли в виде невязки по величине прогибов, которые использовались в разрешающем уравнении в аппроксимированном виде в соответствии с рис. 2.30. Во всем диапазоне изменения ширины подгибаемой полки невязка не превышала 10 %, что хорошо иллюстрирует рис. 2.28. Для последующих переходов невязка достигала величин 17,4 % (третий переход) и 22,4 % (четвертый переход). Для последних двух переходов расчеты не выполнялись в связи с малой величиной прогибов донной части профиля и, следовательно, большой относительной ошибкой в их измерении.

Из рис. 2.28 видно, что предельный момент практически в два раза превышает момент от перерезывающих сил. Это означает, что уголковая зона приходит в пластическое состояние лишь вблизи текущего перехода, по-видимому, до места максимального выпучивания дна профиля с отсчетом от осевой плоскости текущего перехода.

Из формулы (2.69) следует, что максимальный поворот сечения уголка имеет место в центре выпученного участка, уменьшаясь при движении к краям. Однако, уголковые участки профиля, примыкающие к осевой плоскости, как уже обсуждалось выше, испытывают пластическое кручение, в то время как более удаленные от осевой плоскости участки уголковой зоны находятся в упругом состоянии. Различие условий подкрепления оболочки вдоль координаты x_3 влияет и на характер выпучивания, который отличается от гипотетического, описываемого функцией $\omega(x_1, x_3)$, и представляет собой «горку» с вершиной, положение которой можно определить с помощью формулы (2.71). В этой связи следует ожидать изменения радиуса зоны сгиба на участках, примыкающих к осевой плоскости, что было установлено экспериментально [58] без соответствующего объяснения этого эффекта. Отчасти данное небрежение объясняется слабым проявлением эффекта при профилировании заготовок с малой шириной полок и узким дном ($b/s_0 < 25$; $C/s_0 < 20$). Описанный эффект выпучивания дна профиля, являясь положительным с точки зрения разгрузки подгибаемой полки, оказывается отрицательным при изготовлении тонкостенных профилей значительных габаритных размеров сечения (если один из размеров составляет более $1/3$ межклетьевого расстояния). В этом случае зона плавного перехода поглощает зону стабилизации $L_{ст}$ (межклетьевого расстояния недостаточно для свободного формообразования), в результате чего перед роликами текущего перехода образуется «хлопун», неравномерность осадки которого в роликах приводит к эффекту неравновесной скрутки с прощелкиванием. На готовом профиле донная часть в этом случае имеет периодические локальные выпучивания, различимые визуально. В случае равномерной осадки вблизи уголковых зон могут наблюдаться мелкие поперечные или косые гофры (на профилях с цинковым покрытием можно видеть темные линии от неравномерного контактного взаимодействия заготовки с роликом, напоминающие линии Чернова – Людерса). С подобными проблемами приходится сталкиваться и при производстве гофриро-

ванных профилей. Так, в 1992 году при внедрении линии производства гофрированного листа 1250x0,3 мм с высотой гофр 15 мм на предприятии «САМЕКО» (металлургический комбинат, г. Самара) из-за малого межклетьевого расстояния станка возникали мелкие рифты у основания гофр. При равномерной осадке больших «горок» на донной части профиля могут оставаться чашеобразные хлопуны с относительно равномерным шагом, хорошо различимые в отраженном свете.

Угол поворота сечения θ'_k представляет собой так называемый угол «ослабления» режима подгибки по сравнению с режимом подгибки полок при формообразовании профиля с абсолютно жестким дном. На рис. 2.31 приво-

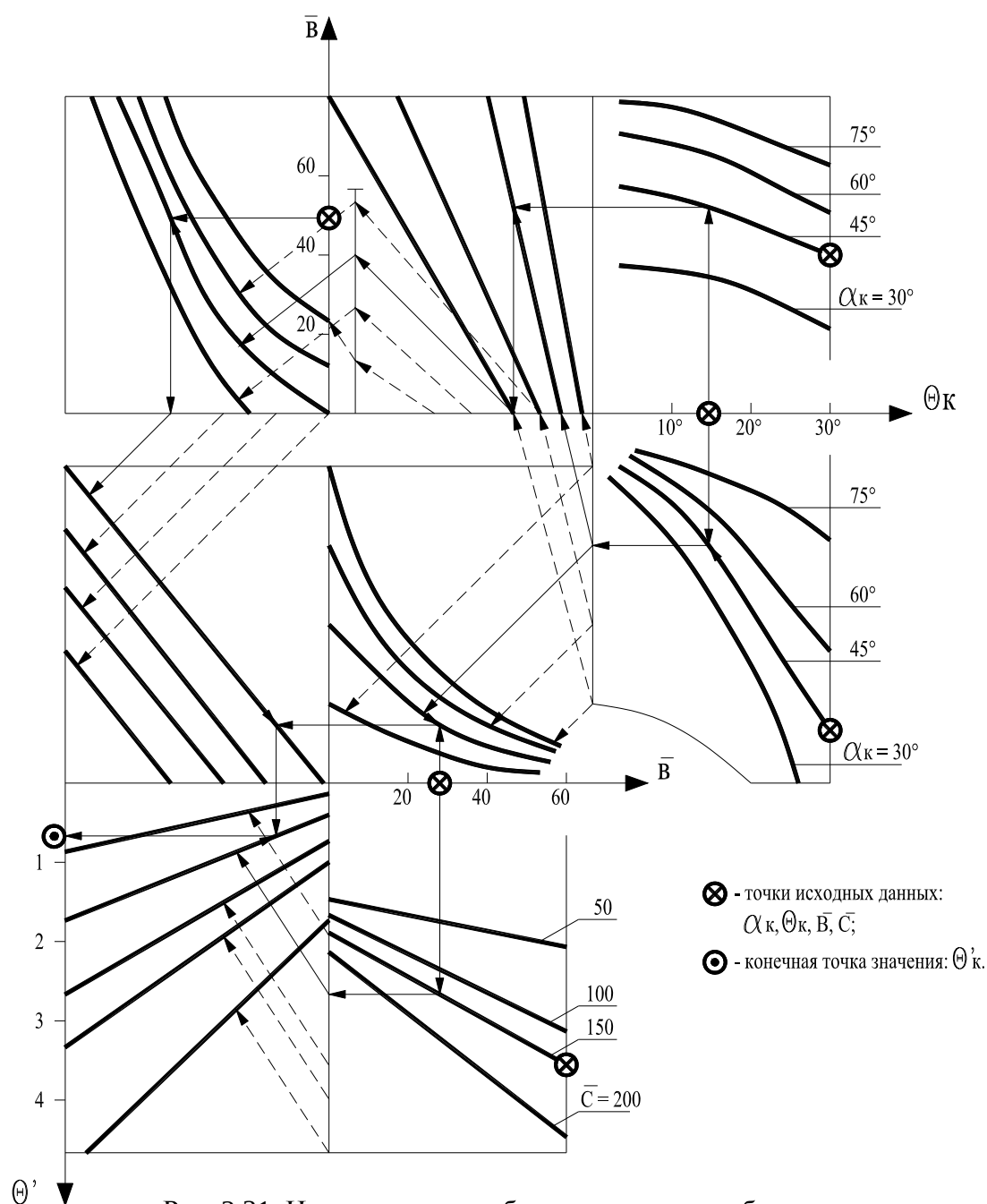


Рис. 2.31. Номограмма ослабления углов подгибки

дится номограмма определения угла «ослабления» в зависимости от суммарного угла подгибки, угла подгибки в текущем переходе, относительной ширины полки и относительной ширины дна, построенная на основе разработанной теоретической модели с использованием пакета MathCAD – 2001 Pro и экспериментальных данных. Процедура отыскания угла ослабления указана на рис. 2.31 линиями со стрелками. Исследование зависимости (2.69) по номограмме показывает, что угол ослабления при углах подгибки более 30 градусов, толщине заготовки 0,6 мм и ширине подгибаемой полки более 50 толщин заготовки может достигать 5 градусов. Разумеется, с увеличением толщины заготовки эффект «ослабления» будет убывать, если только он не будет компенсирован увеличением ширины донной части профиля. При разработке технологии эффект «ослабления» углов подгибки следует учитывать, назначая более жесткие режимы подгибки для профилей с широким дном. Суммарное дифференцированное (с учетом рис. 2.31) увеличение углов подгибки на всех переходах фактически приводит к уменьшению потребного числа переходов на единицу, что позволяет уменьшить количество формирующих роликов и расширить технологические возможности применяемого оборудования в связи с появлением возможности освоения номенклатуры профилей, которая требовала бы большего числа клетей по сравнению с наличным в станках модели ГПС-300М6.

Отметим, что данная разработанная впервые на основе механики деформируемого твердого тела теоретическая модель описания эффектов прогиба донной части заготовки при ее формообразовании в роликах в пределах 10 – 12 % согласуется с опытными данными.

Выводы

Анализ способов предотвращения кромковой волнистости по разработанному классификатору показал, что наиболее эффективными подходами являются оптимизация углов подгибки и числа переходов для базовой схемы формообразования, изменение формы линии профилирования (углов захода и выхода профиля), а также применение специальных устройств типа межклетевых проводок.

Математическая модель зоны плавного перехода хорошо согласуется с моделями других авторов и учитывает по сравнению с ними дополнительные факторы: диаметры роликов, радиусы зон сгиба и анизотропию. На основе модели сформулирован критерий ограничения углов подгибки по переходам, исходя из принципа минимизации энергии деформирования. Модель также дает возможность расчета межклетьевого расстояния для профилегибочного оборудования.

Анализ деформационных параметров подгибаемых полок позволил разработать эффективный подход к предотвращению кромковой волнистости: выявлены аналитические и графические зависимости для задания оптимальных углов подгибки полок.

Показано влияние изменения формы линии профилирования (углов захода и выхода профиля) на деформационные характеристики полки: определяющее значение при этом имеет угол выхода.

На основе анализа напряженно-деформированного состояния подгибаемой полки и модельной задачи гибки профиля по контуру сформулирован критерий возникновения кромковой волнистости в виде индикаторной функции.

Установлена аналитическая зависимость определения числа переходов от основных факторов процесса профилирования для основных типов профилей: уголкового, швеллерного, корытного и С – образного.

Впервые выявлены эффекты влияния на технологический процесс ширины дна профиля. Разработанная на основе механики деформируемого твердого тела теоретическая модель описания эффектов прогиба донной части заготовки при ее формообразовании в роликах в пределах 10 – 12 % согласуется с опытными данными

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ В РОЛИКАХ

Теоретические зависимости, полученные в предыдущем разделе при ряде допущений, подлежат экспериментальной проверке для обеспечения надежности технологии.

3.1. Программа экспериментальных исследований

3.1.1. Цель и задачи исследований

Целью настоящих исследований являются установление закономерностей формообразования заготовки в роликах, условий и параметров локальной потери устойчивости, а также потребного числа переходов.

Основные задачи исследований:

- верификация теоретической модели зоны плавного перехода;
- установление факторов, влияющих на локальную потерю устойчивости заготовки при профилировании;
- выявление предельных возможностей процесса формообразования при условии отсутствия кромковой волнистости;
- определение параметров кромковой волнистости при различных условиях процесса формообразования;
- оценка деформационных параметров подгибаемых полок;
- анализ моделей эмпирического числа переходов при формообразовании основных типов профилей.

3.1.2. Основные факторы процесса и применяемые методы

Как установлено в разделах 1 и 2, основными факторами, влияющими на процесс пластического формоизменения заготовки при интенсивном деформировании являются:

- характеристики оборудования (количество переходов и межклетьевое расстояние при скорости профилирования в пределах от 4 до 20 м/мин);
- геометрические характеристики сечения профиля (форма и размеры);
- технологические характеристики (параметры заготовки; схемы и режимы формообразования, включающие углы подгибки по переходам, величину и точность установки зазоров в формующих калибрах, выбор и установку оси профилирования).

В качестве основных методов исследований применялись:

- геометрические методы измерения линейных и угловых величин;
- косвенный метод оценки продольных деформаций;
- метод измерения твердости по Виккерсу;
- методы статистического анализа.

3.1.3. Программа исследования и применяемые средства

Программа исследований предусматривала следующие этапы:

1. Экспериментальное исследование зоны плавного перехода, являющейся функцией геометрических и технологических характеристик.
2. Анализ номенклатуры профилей, имевших дефекты при отработке технологии.
3. Исследование предельных возможностей процесса и характеристик участков потери устойчивости.
4. Оценка деформационных параметров элементов профиля и верификация критерия потери устойчивости периферийных элементов.
5. Анализ эмпирического числа переходов.

При реализации программы экспериментальных исследований применяли оборудование, инструменты и приборы, указанные в табл. 3.1.

При настройке профилегибочного оборудования и формующей оснастки контролировали следующие параметры:

- расположение оси профилирования в горизонтальной плоскости;
- расположение оси профилирования в вертикальной плоскости;
- расположение оси профилирования относительно базовой плоскости;
- расположение направляющего устройства;
- зазоры в формующих калибрах экспериментального оснащения;
- соответствие параметров заготовки предъявляемым к ней требованиям.

В экспериментальных исследованиях ширина заготовки соответствовала ширине развертки калибра; зазор в роликах брали равным толщине заготовки; ось профилирования настраивали по прямой линии.

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

Таблица 3.1

Оборудование, инструменты и приборы для экспериментальных исследований

	Наименование	Назначение	Примечание
1.	Ножницы дисковые ДИН-600	Подготовка заготовок	
2.	Гибочно-прокатные станки: ГПС-200М11, ГПС-350, ГПС-350М6, ГПС-350М8	Профилирование заготовок	
3.	Экспериментальная оснастка	Исследование схем формообразования	
4.	Пресс ПИГПЛУ-1	Физическое моделирование потери устойчивости полок	Нест.
5.	Устройство для измерения прогибов с индикатором часового типа (ИЧТ)	Измерение прогибов профиля	ГОСТ 577-68 (ИЧТ)
6.	Прибор МПБ-2	Измерение расстояний на элементах профиля, его толщины	
7.	Прибор ПМТ-3	Измерение твердости	
8.	Цифровой фотоаппарат QV-R4 фирмы CASIO, сканер «MUSTEK-4800»	Фотографии и изображения образцов	
9.	Компьютер Pentium (I – III)	Ведение базы данных изготавливаемых профилей, технологических особенностей изготовления, статистическая обработка результатов, выполнение расчетов	
10.	Штангенциркули ШЦ-I, ШЦ-III	Измерение линейных параметров заготовок, оснастки	ГОСТ 166-80
11.	Наборы щупов № 2, № 4	Замер зазоров в роликах	ГОСТ 882-75
12.	Наборы радиусных шаблонов № 1, № 3	Замер радиуса кривизны заготовки в междетельном пространстве и радиусов скругления роликов	ГОСТ 4126-82

3.1.4. Применяемые материалы

Выбор материалов для экспериментальных исследований был определен номенклатурой профилей, пользующихся спросом на отечественном рынке. Поэтому материалом заготовок являлись преимущественно стали группы 08 толщиной от 0,5 до 1,5 мм с цинковым покрытием и без него, а также с лакокрасочными и полимерными покрытиями (при статистическом анализе были рассмотрены профили с толщиной стенок до 3 мм).

В партиях поставляемых материалов производились выборочные испытания стандартных образцов на растяжение с помощью разрывной машины Р-5. Результаты испытаний не выходили за пределы, установленные ГОСТ или ТУ. Материалы указанного класса достаточно хорошо изучены в диссертации Титова Ю. А. [163], где показано, что поставляемые отечественными металлургическими предприятиями материалы удовлетворяют сертификатам качества или НТД.

3.2. Исследование зоны плавного перехода

Объектом исследования являлись преимущественно профили швеллерного типа. Для сравнения приведены также результаты исследований по профилям С – образного и корытного типов.

3.2.1. Протяженность зоны плавного перехода швеллерного профиля

Протяженность плавного перехода измеряли с помощью металлической линейки, смонтированной на специальной стойке. Замеры осуществлялись с точностью до 1 мм по линейке с миллиметровой шкалой при использовании ориентирующего металлического угольника. Штангенциркулем фиксировали ширину профиля в зоне стабилизации непосредственно за парой роликов предшествующего перехода зажимным винтом и перемещали штангенциркуль вперед до появления зазора, что соответствовало отметке на полке профиля, которую наносили карандашом с толщиной стержня 0,5 мм. Схема измерений приведена на рис. 3. 1.

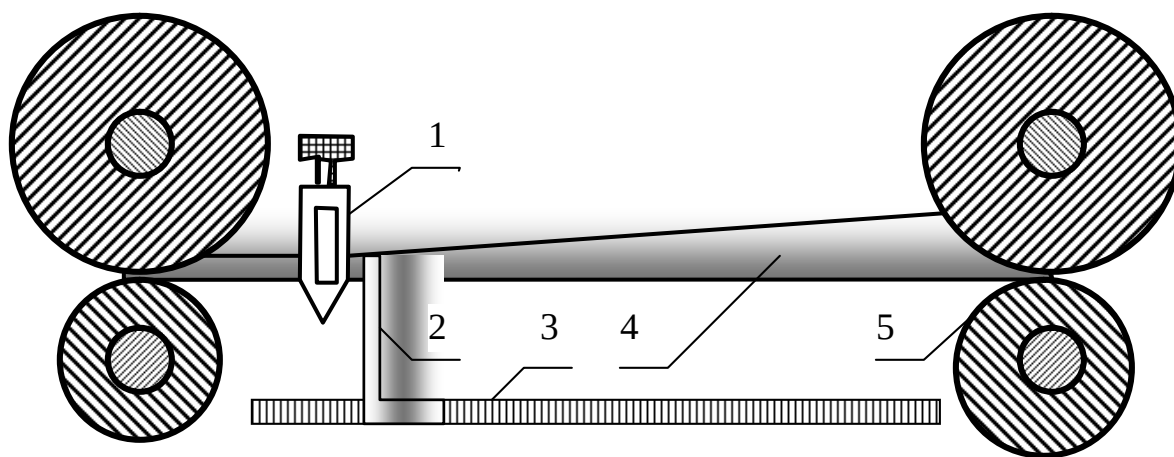
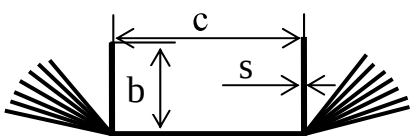


Рис. 3.1. Схема измерения протяженности зоны плавного перехода: 1 – штангенциркуль; 2 – угольник; 3 – линейка; 4 – профиль; 5 – ролик

Значения радиусовгиба принимались на всех переходах равными толщине исходной заготовки, катающие диаметры роликов назначались постоянными по всем переходам. Объект исследования и факторы эксперимента представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Варьируемые величины при проведении эксперимента

Эскиз сечения профиля	Варьируемые величины и их значения		
	Угол подгибки θ , град.	Толщина s , мм	Ширина полки b , мм
	20, 25, ..., 50	0,6; 0,8; 1,0; 1,2	20, 30, 40, 50

Эксперименты до начала разработки технологии на номенклатуру профилей к внедрению проводили за один переход с использованием направляющего устройства станка ГПС-350М. Ширину дна профиля принимали равной 110 мм, что было обусловлено соображениями, связанными с максимальной жесткостью дна профиля из номенклатуры профилей, подлежащих внедрению. Применяли экспериментальные комплекты роликов, описанные в разделе 3.4. Материал заготовок – сталь оцинкованная. Замеры производили троекратно путем прогонки заготовки на 100 – 150 мм от измерения к измерению. Затем данные обрабатывали в среде MathCAD – 2001 Pro, представленные на рис. 3.2 – 3.5 в виде линейных моделей. Отклонения экспериментальных значений от данных моделей не превышали 11%.

Как показывают графики на рис. 3.2 – 3.5, протяженность зоны плавного перехода существенно возрастает с увеличением ширины полки и угла подгибки. При этом для различных толщин заготовки прослеживается четкая тенденция уменьшения протяженности зоны плавного перехода с увеличением толщины заготовки (ср. абсолютные значения L на рис. 3.2 – 3.5 для одних и тех же значений ширины полки).

На рис. 3.6 дано сравнение теоретических данных (сплошные линии; см. формулу (2.20)) и экспериментальных результатов (отмечены точками). Экспериментальные результаты на рис. 3.6 сняты с первых переходов с варьированием (уменьшением) ширины полки. Фактическое значение углов подгибки располагалось в пределах 18 – 20° (среднее значение угла подгибки для теоретической модели – 20°). Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышало 10 %.

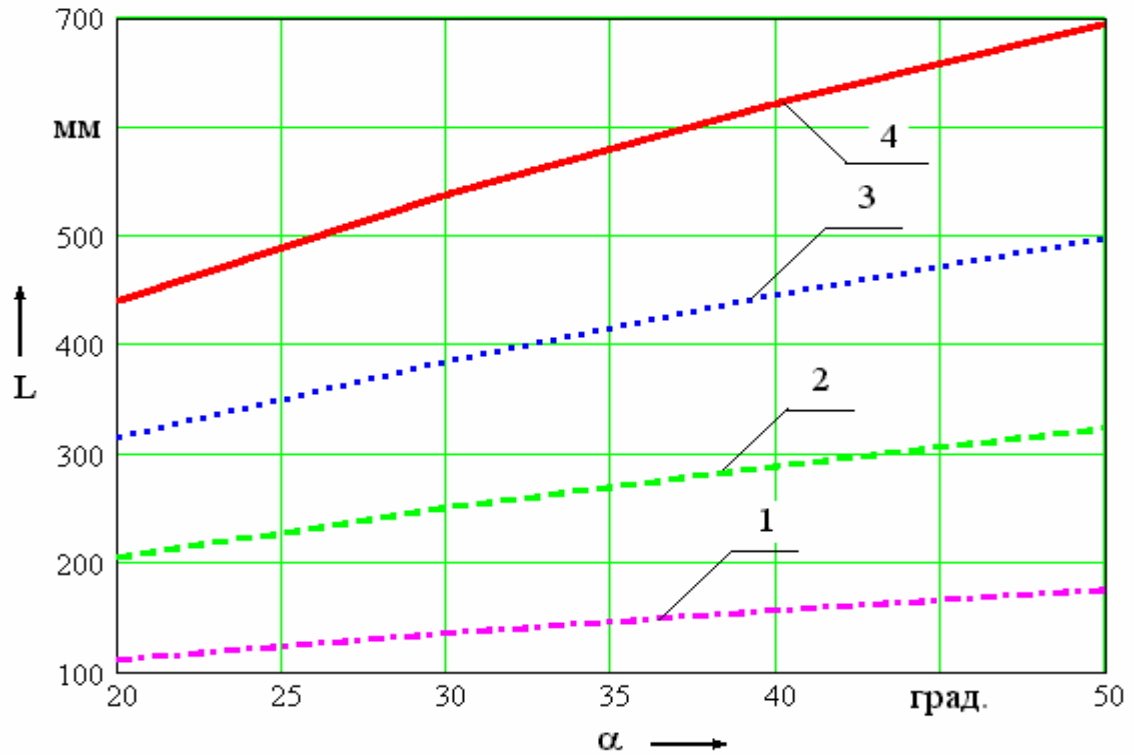


Рис. 3.2. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $C = 100$ мм и $s = 0,6$ мм: 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

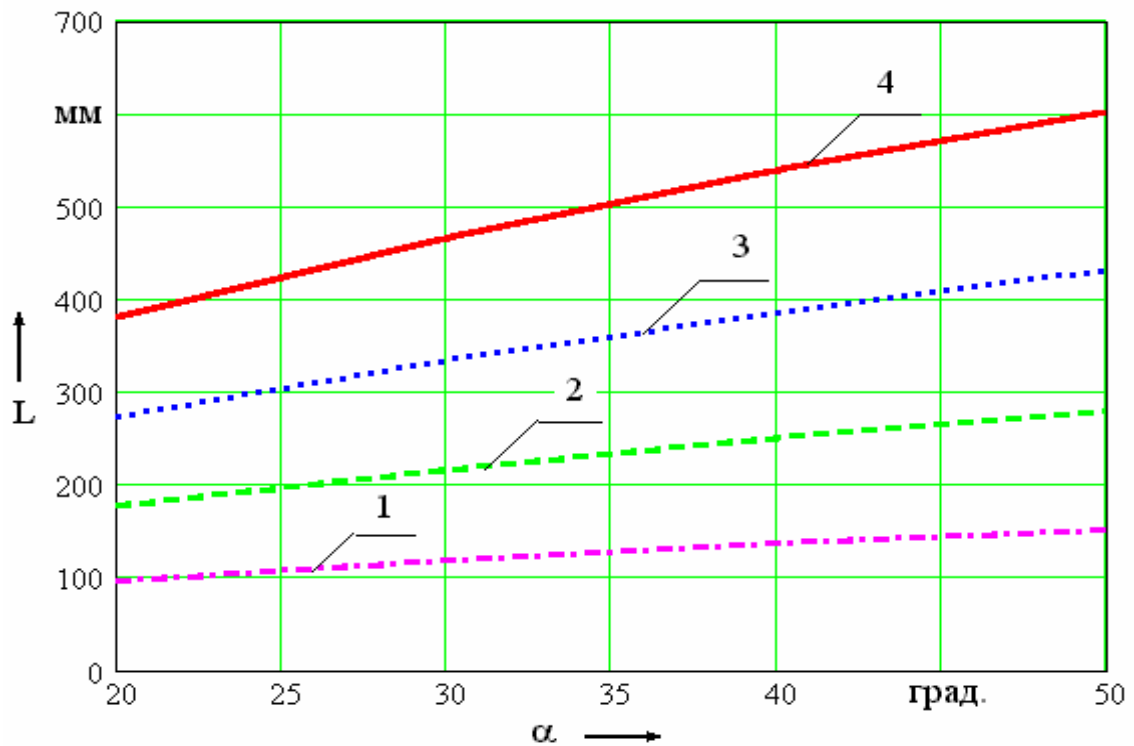


Рис. 3.3. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $s = 0,8$ мм и $C = 100$ мм: 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

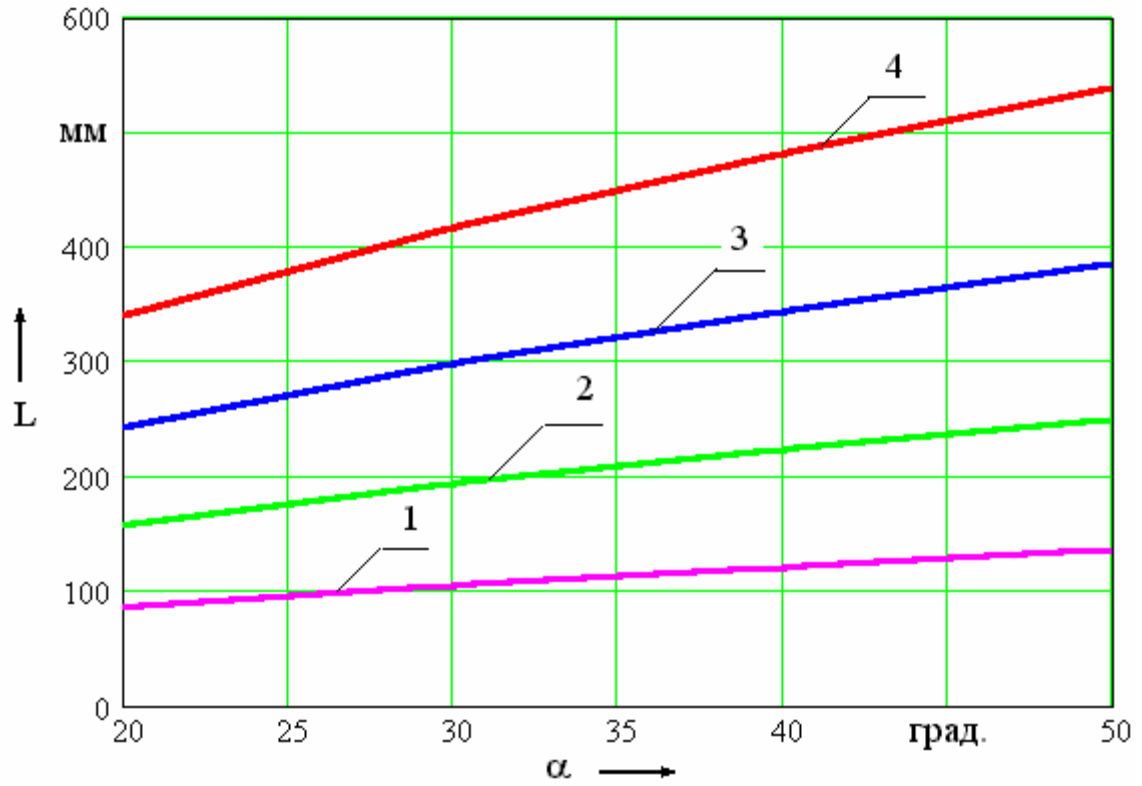


Рис. 3.4. Зависимость зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $C = 100$ мм и $s = 1,0$ мм: 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

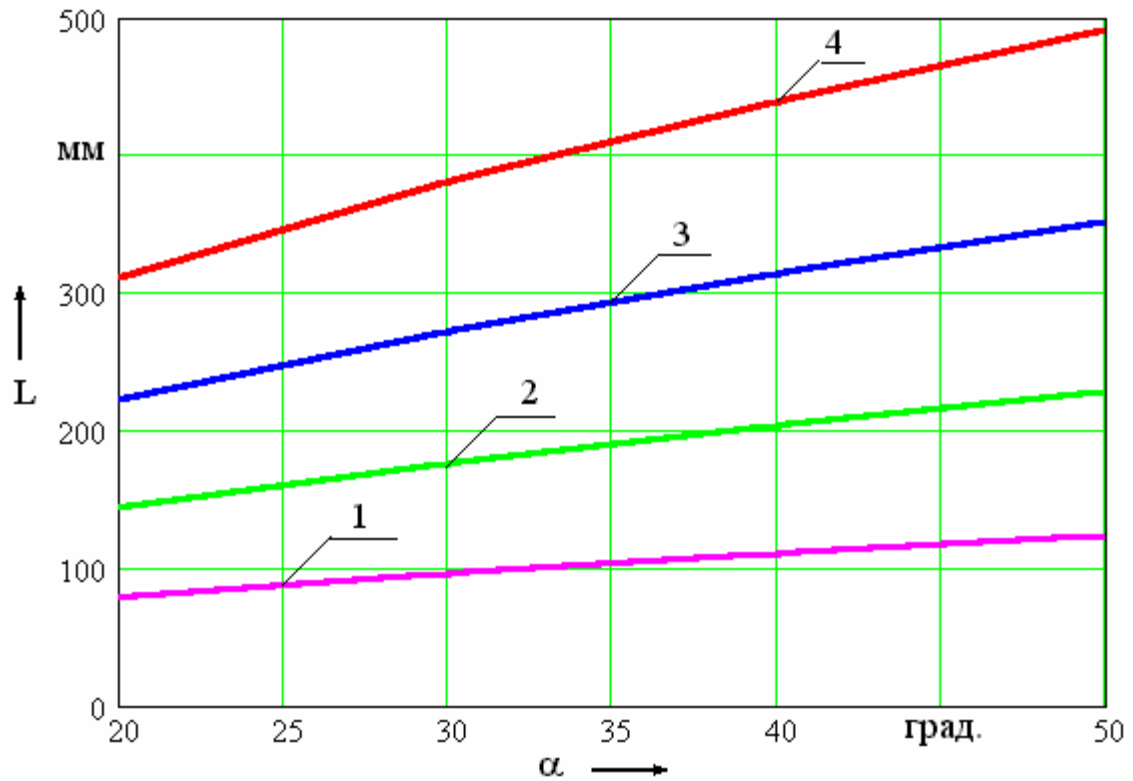


Рис. 3.5. Зависимость зоны плавного перехода от угла подгибки и ширины полки при $C = 100$ мм и $s = 1,2$ мм: 1 – $b = 20$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 40$ мм; 4 – $b = 50$ мм

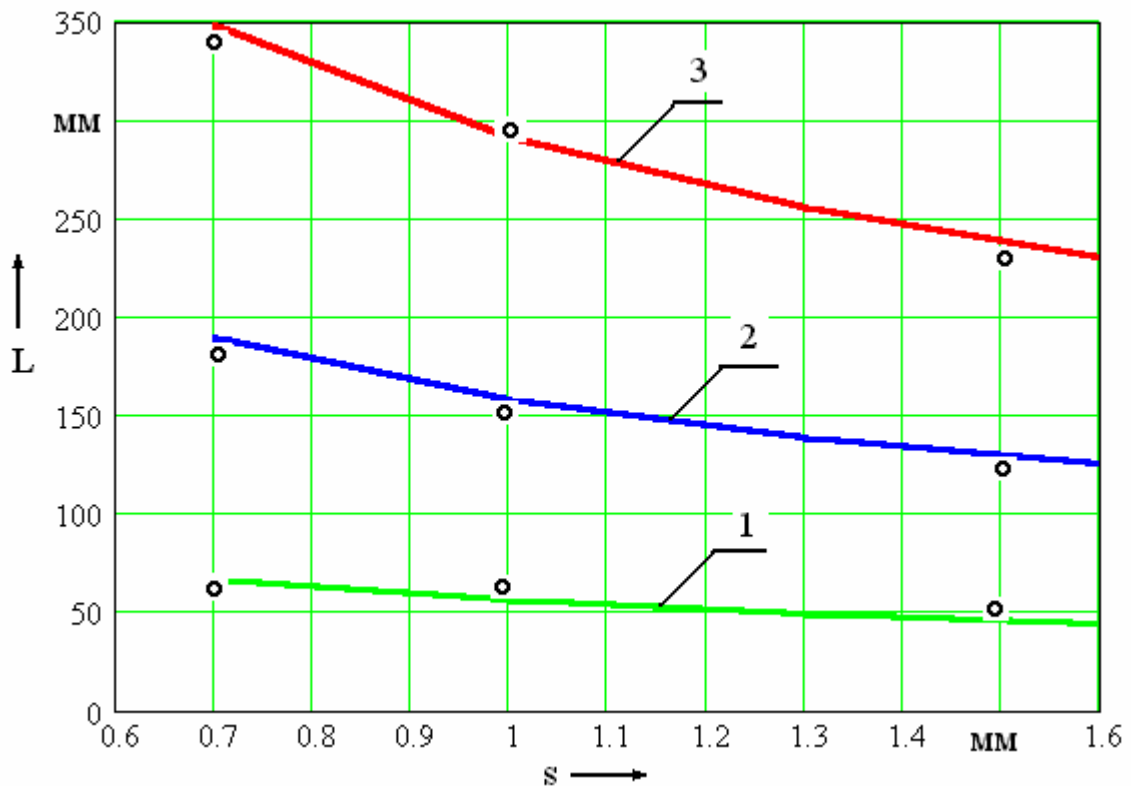


Рис. 3.6. Сравнение экспериментальных и теоретических данных по определению протяженности зоны плавного перехода при угле подгибки 20° и $C = 100$ мм: 1 – $b = 15$ мм; 2 – $b = 30$ мм; 3 – $b = 45$ мм

3.2.2. Влияние ширины дна профиля

Для установления влияния ширины дна и суммарных углов подгибки профиля на протяженность зоны плавного перехода с целью обобщения полученных результатов на более широкую номенклатуру профилей, проводили замеры протяженности зоны плавного перехода на стадии отработки технологии на каждом из переходов. Оптимизацию проведения экспериментов и их количества производили путем анализа номенклатуры профилей, подлежащих внедрению. Затем экспериментальные данные сравнивали со значениями теоретической модели и подсчитывали расхождение экспериментальных и теоретических результатов для каждого перехода по формуле:

$$\xi = \frac{L_{\text{э}} - L_{\text{т}}}{L_{\text{э}}} \cdot 100\%$$

где $L_{\text{э}}$, $L_{\text{т}}$ – экспериментальное и теоретическое значение протяженности зоны плавного перехода соответственно.

Наличие отклонений измеряемого параметра лишь в одну сторону от теоретических данных во всех переходах отмечалось соответствующим знаком «+» или «-». В других случаях указан лишь модуль максимального отклонения.

Результаты замеров протяженности зоны плавного перехода для различных типоразмеров профилей приведены в табл. 3.3 – 3.8. При изготовлении

уголкового профиля с шириной полок 15 и 30 мм (табл. 3.3) использовали два перехода, в то время как при изготовлении профиля с шириной полок 45 мм применяли три перехода.

Табл. 3.3 показывает, что с увеличением ширины полки протяженность зоны плавного перехода увеличивается, причем, отклонение экспериментальных данных от теоретических результатов имеет тенденцию к увеличению с уменьшением толщины заготовки. При толщине заготовки менее 1 мм отклонение всегда имело отрицательное значение.

Таблица 3.3

Протяженность зоны плавного перехода уголкового профиля

№ опыта	b, мм	θ, град.			L, мм			ξ, %
		Номер перехода			Номер перехода			
		1	2	3	1	2	3	
s = 0,7 мм								
1	15	25	20	—	72	65	—	(–) 8,3
2	30	25	20	—	202	184	—	(–) 5,9
3	45	20	15	10	333	292	236	(–) 4,5
s = 1,0 мм								
4	15	25	20	—	63	56	—	(–) 3,6
5	30	25	20	—	174	156	—	(–) 2,9
6	45	20	15	10	297	258	211	2,8
s = 1,2 мм								
7	15	25	20	—	54	48	—	(+)3,7
8	30	25	20	—	144	128	—	(–)2,3
9	45	20	15	10	237	205	167	(–2,1)

В табл. 3.4 и 3.5 приведены данные замеров протяженности зоны плавного перехода профилей с шириной дна 110 и 195 мм соответственно. Полученные результаты подтверждают тенденции зависимости величины L от толщины материала и ширины полки, однако наблюдается и устойчивая закономерность в отклонениях экспериментальных данных от теоретических (см. последнюю колонку табл. 3.4 и 3.5).

Как показали дальнейшие исследования, указанные закономерности не являются случайными, а связаны с дополнительным эффектом, сопровождающим процесс формообразования тонкостенных профилей. Установлено, что при формообразовании тонкостенных профилей с широким дном (например, при $C/s > 100$) возникает «эффект желобчатости» – прогиб донной части профиля, позволяющий назначать более жесткие режимы подгибки для таких профилей по сравнению с профилями, имеющими соизмеримые ширину полки и ширину дна (см. табл. 3.6).

Таблица 3.4

Протяженность зоны плавного перехода швеллерных профилей при $s=110$ мм

№ опыта	S, мм	L, мм						ξ, %
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
b = 30 мм								
1	0,7	192	180	164	158	148	134	(-)9,4
2	1,0	162	156	142	131	118	109	(-)8,2
3	1,2	146	137	129	119	111	104	(-)4,5
4	1,5	132	128	114	108	102	94	5,3
b = 45 мм								
5	0,7	352	334	300	274	262	246	(-)7,8
6	1,0	331	296	252	233	212	199	(-)6,6
7	1,2	272	253	228	217	203	190	5,2
8	1,5	242	227	210	188	173	168	4,7

Таблица 3.5

Протяженность зоны плавного перехода швеллерных профилей при $s=195$ мм

№ опыта	S, мм	L, мм						ξ, %
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
b = 30 мм								
1	0,7	184	170	160	156	141	127	(-)13,7
2	1,0	157	144	136	122	114	105	(-)11,6
3	1,2	138	131	124	115	109	101	(-)7,3
4	1,5	126	117	110	106	101	92	5,4
b = 45 мм								
5	0,7	348	326	293	272	262	240	(-)10,4
6	1,0	321	397	244	226	209	188	(-)8,7
7	1,2	267	242	229	231	204	182	7,2
8	1,5	236	228	207	191	176	161	6,1

Анализ табл. 3.6 показывает, что тенденция отклонений реальной протяженности зоны плавного перехода от теоретических значений не прослеживается и по переходам имеются отклонения как в одну, так и в другую сторону. Из рассмотрения последних колонок табл. 3.5 и 3.6 следует, что «эффект желобчатости» явно выражен лишь для профилей с толщиной стенки менее 1 мм. При больших толщинах имеются отклонения разных знаков. В дальнейшем, при разработке технологии следует учитывать этот эффект, который позволяет в первом приближении увеличивать углы подгибки по переходам на 1,5 – 2 градуса на каждые 100 мм ширины дна профиля в пределах ширины дна до 250

мм. Этот эффект также объясняет потребность в большем числе переходов для изготовления профиля с узким дном по сравнению с профилем, имеющим широкую донную часть, а также более частое появление кромковой волнистости на полках профилей с узким дном.

Таблица 3.6

Протяженность зоны плавного перехода швеллерных профилей при $c \approx b$

№ опыта	S, мм	L, мм						ξ, %
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
1*	0,6	189	178	169	161	147	134	3,6
2**	1,0	162	151	145	138	122	112	4,1
3**	1,5	146	139	134	129	117	104	3,3
4***	2,5	132	124	119	115	106	93	5,2
* – c = b = 28 мм (Москва - «Центр кровли»)								
** – c = b = 30 мм (Москва)								
*** – c = b = 32 мм (Сызрань)								
Опыт 2 – Зазор в калибре 1,5 мм								

3.2.3. Зона плавного перехода С – образного и корытного профиля

При изготовлении С – образного профиля оценку протяженности зоны плавного перехода производили с использованием следующего алгоритма. Подсчитывали протяженность зоны плавного перехода для первых трех переходов как и для швеллерного профиля с шириной подгибаемой полки, равной суммарной ширине боковой и горизонтальной полки по готовому профилю. На трех последующих переходах к расчетной протяженности зоны плавного перехода боковой полки прибавляли протяженность зоны плавного перехода горизонтальной полки, умноженной на фактор жесткости, аналогичный фактору, определяемому формулой (2.27).

Замеры действительной протяженности зоны плавного перехода (табл. 3.7) дают отклонения от расчетных значений в пределах 17 %. Усредненные значения протяженности зоны плавного перехода приведены в последних колонках табл. 3.7

Аналогично предыдущему были выполнены расчеты и для корытного профиля (табл. 3.8), указывающие на отсутствие переформовки заготовки при изготовлении профиля за шесть переходов. Следует заметить, что с увеличением горизонтальных полок применяемый алгоритм подсчета дает значительную ошибку (20 % и более), а потому возникает задача создания более надежного алгоритма подсчета протяженности зоны плавного перехода для профилей с числом зон сгиба более четырех с использованием локальных характеристик жесткости элементов профиля.

Таблица 3.7

Протяженность зоны плавного перехода С – образных профилей
при $b=45$ мм, $g=13$ мм

№ опыта	S, мм	L, мм						Среднее L_{Σ} , мм
		Номер перехода						
		1	2	3	4	5	6	
с = 145 мм								
1	0,7	315	283	261	251	238	228	312
		55	49	47	52	44	39	
2	1,0	293	273	254	238	219	208	291
		51	46	40	37	42	42	
3	1,2	262	245	234	216	202	189	261
		44	41	38	31	34	28	
4	1,5	230	211	195	188	180	167	231
		41	36	39	37	32	31	
с = 200 мм								
5	0,7	302	273	252	239	226	211	288
		43	37	34	41	38	33	
6	1,0	291	271	248	231	212	202	279
		41	38	34	33	35	37	
7	1,2	255	246	219	200	194	187	252
		37	34	35	35	32	36	
8	1,5	221	209	192	176	167	164	219
		34	31	27	29	30	31	
В верхней ячейке – значение L подгибаемой полки; в нижней ячейке – значение L периферийного элемента								

Таблица 3.8

Протяженность зоны плавного перехода корытного профиля 103x27x20 мм

S, мм	L, мм						Среднее L _Σ , мм
	Номер перехода						
	1	2	3	4	5	6	
0,7	148	136	127	132	133	128	243
	104	98	93	91	86	87	
В верхней ячейке – значение L подгибаемой полки; в нижней ячейке – значение L периферийного элемента							

Указанные проблемы в определении локальных характеристик жесткости не являлись предметом специального рассмотрения в настоящей работе, хотя нами уже получены некоторые обнадеживающие результаты, касающиеся установления закономерностей формообразования многоэлементных профилей с использованием данного подхода.

3.3. Анализ номенклатуры профилей, имевших дефекты при отработке технологии их изготовления

В табл. 3.9 приведена номенклатура анализируемых профилей и характеристики их поперечных сечений. В табл. 3.10 указано профилегибочное оборудование, на котором производилась отработка профилей согласно табл. 3.9.

Для выявления подверженности профилей дефектам типа кромковой волнистости [61, 152] при отработке технологии был проведен статистический анализ более трехсот типоразмеров профилей и условий их формообразования с помощью пакета Microsoft EXCEL 97.

Анализ проводили на основе журналов технологической отработки профилей, содержащих следующую информацию:

- 1) Чертеж сечения профиля, материал профиля.
- 2) Марка оборудования, число задействованных клеток.
- 3) Отклонения параметров технологического оснащения и их изменение в процессе отработки.
- 4) Режимы настройки оборудования (направляющего и правильного устройств, форма линии профилирования).
- 5) Отклонения размеров профиля, вид дефектов.

Исследуемые профили изготавливались на различном профилегибочном оборудовании, указанном в табл. 3.10 [167, 19].

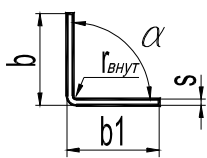
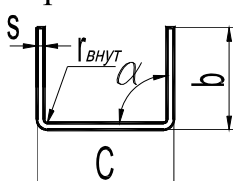
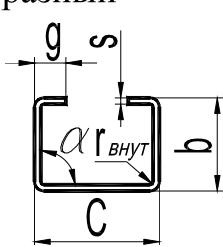
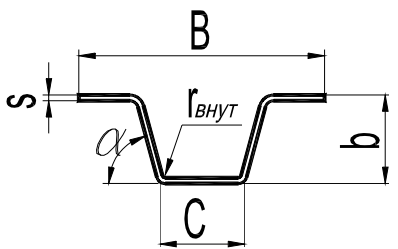
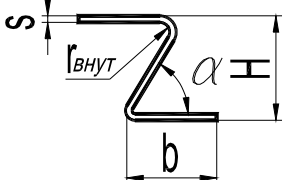
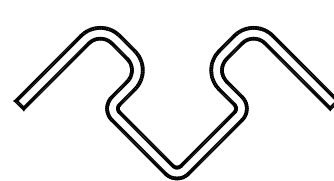
Виды потери устойчивости периферийных элементов некоторых типов профилей показаны на рис. 3.7. Как указывалось выше, подавляющее число случаев потери устойчивости периферийных элементов профилей проявляется в форме кромковой волнистости. На рис. 3.8 представлены результаты статистических исследований изготовления профилей гибкой прокаткой, показывающие соотношение общего количества отработанных профилей определенного типа и количества профилей, имевших дефекты в форме кромковой волнистости.

Анализ показал, что на отечественном рынке востребованы профили швеллерного типа (до 32%) и специальной формы (до 26 %), суммарная доля профилей остальных четырех групп составляет менее 50 %, при этом проблема кромковой волнистости особенно актуально стоит для профилей швеллерного типа и специальной формы рис. 3.9.

Анализ результатов отработки технологии производства профилей указанной номенклатуры показывает, что кромковая волнистость зависит от применяемого оборудования, геометрии профиля, схем и режимов формообразования. Качественный анализ не позволил выявить влияние механических свойств заготовки на кромковую волнистость. Установлено, что для наиболее общей номенклатуры профилей высотой до 50 мм (до 70% от общего количества) достаточным является шесть переходов. Были установлено, что возникновение

Таблица 3.9

Параметры исследуемых профилей

№	Типовой представитель (сечение)	Параметры профилей	Материалы
1	2	3	4
1	Уголок 	$b = 10 \div 70 \text{ мм};$ $b_1 = 10 \div 70 \text{ мм};$ $\alpha = 45 \div 135^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	Сталь: 3, 08кп, 08пс, 08ю, оцинкованные стали, стали с поли- мерными по- крытиями, ок- рашенные, ла- минированные.
2	Швеллер 	$b = 5 \div 50 \text{ мм};$ $C = 10 \div 220 \text{ мм};$ $\alpha = 45 \div 135^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	
3	C – образный 	$b = 10 \div 50 \text{ мм};$ $g = 5 \div 30 \text{ мм};$ $C = 10 \div 200 \text{ мм};$ $\alpha = 75 \div 135^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	
4	Корытообразный 	$b = 20 \div 50 \text{ мм};$ $C = 15 \div 120 \text{ мм};$ $B = 40 \div 150 \text{ мм};$ $\alpha = 30 \div 90^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	
5	Z-образный 	$b = 5 \div 40 \text{ мм};$ $H = 15 \div 160 \text{ мм};$ $\alpha = 45 \div 135^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм};$ $r_{\text{внут}} = (0,8 \div 2,0)S.$	
6	Специальной формы 	Число зон сгиба – до 12; Ширина заготовки – до 350 мм; $\alpha = 5 \div 180^\circ;$ $s = 0,5 \div 3,0 \text{ мм}.$	

кромковой волнистости возможно при следующих значениях относительной ширины подгибаемой полки профиля b/s при схемах и режимах, характерных для процесса профилирования:

- уголок: при $b/s \geq 50$;
- швеллер: при $b/s \geq 40$;
- С – образный: при $b/s \geq 50$, $g/s \geq 30$.
- корытообразный: зависимость не установлена;
- Z – образный: предположительно зависит от b/s и α ;
- специальной формы: при $s < 1.5$ мм, количество зон сгиба больше семи.

Таблица 3.10

Основные параметры оборудования

№	Модель	Количество клетей, шт.	Межклетье- вое расстояние, мм	Скорость профи- лирования м/мин
1	ГПС 200М11	4	200	4÷20
2	ГПС 350	4	400	
3	ГПС 350 М6	6	400	
4	ГПС 350 М8	8	400	

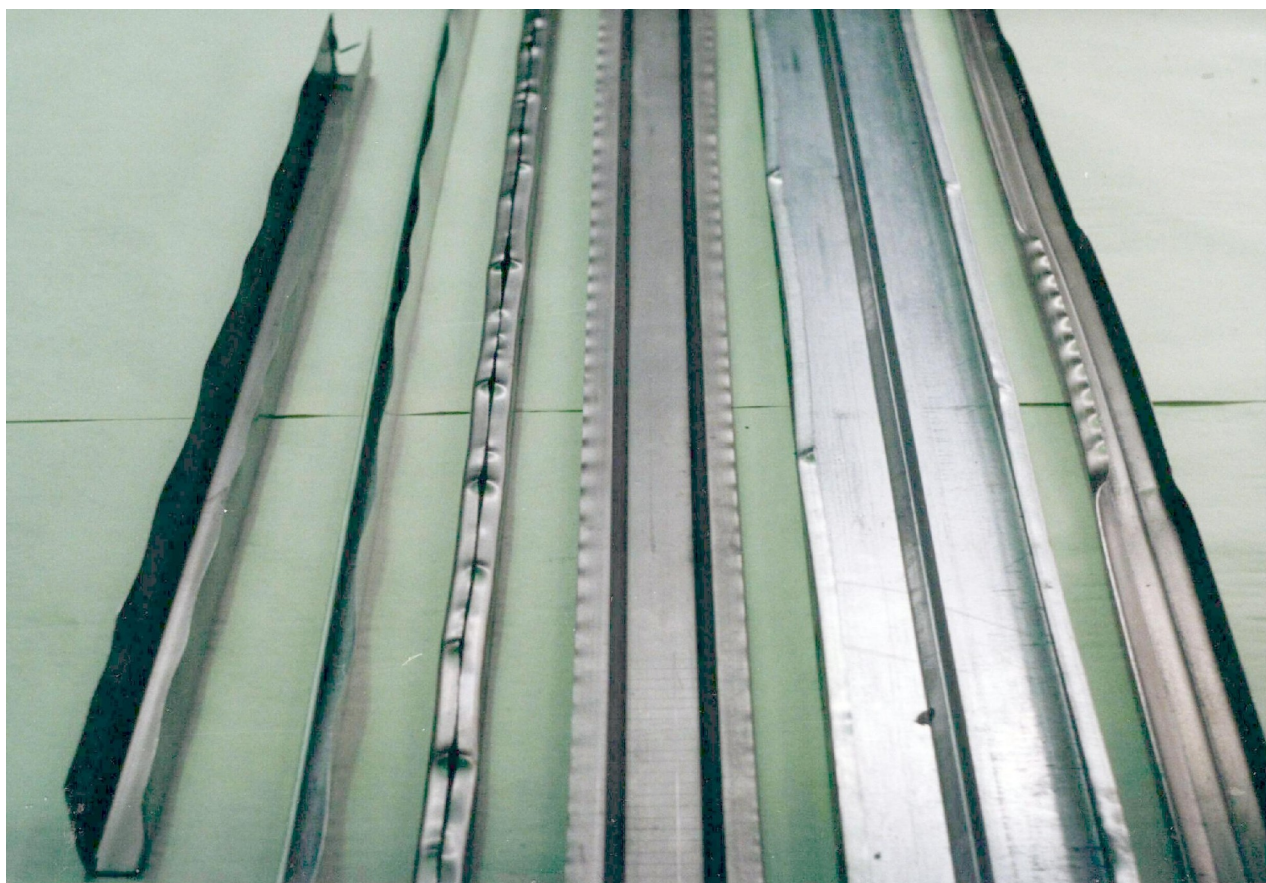


Рис. 3.7. Потеря устойчивости периферийных элементов профилей

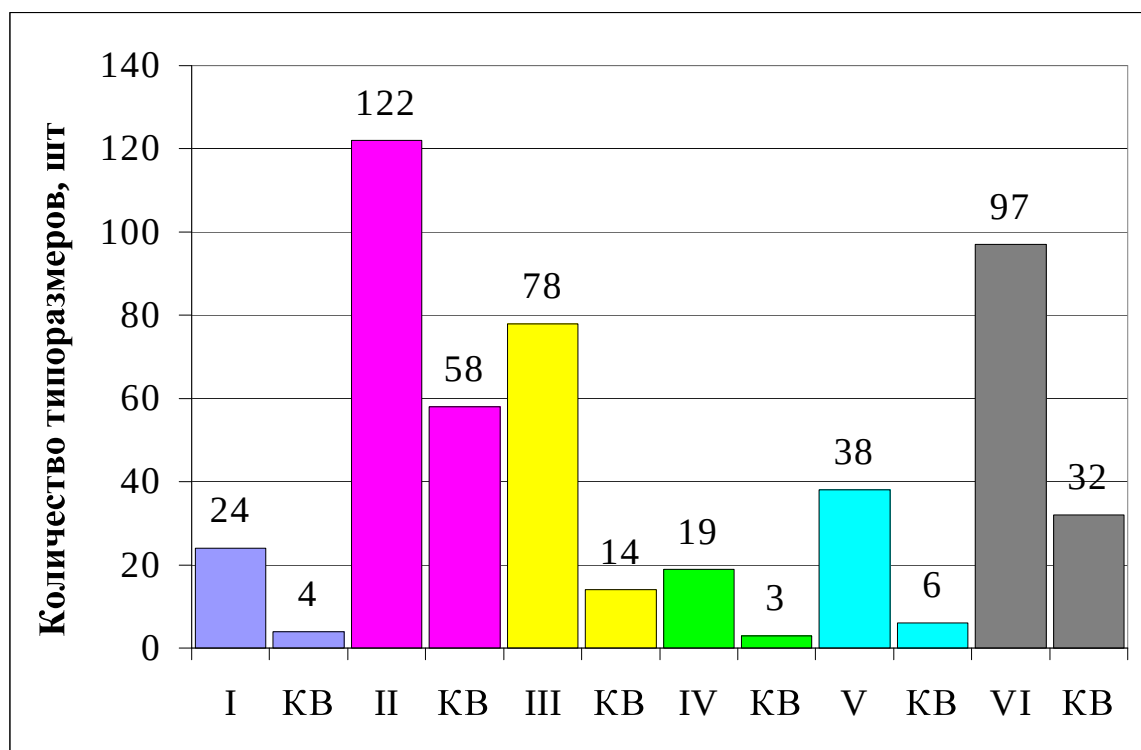


Рис. 3.8. Результаты исследований: I – уголок; II – швеллер; III – С-образный; IV – корытообразный; V – Z-образный; VI – специальной формы. KB – количество типоразмеров профилей, подверженных кромковой волнистости

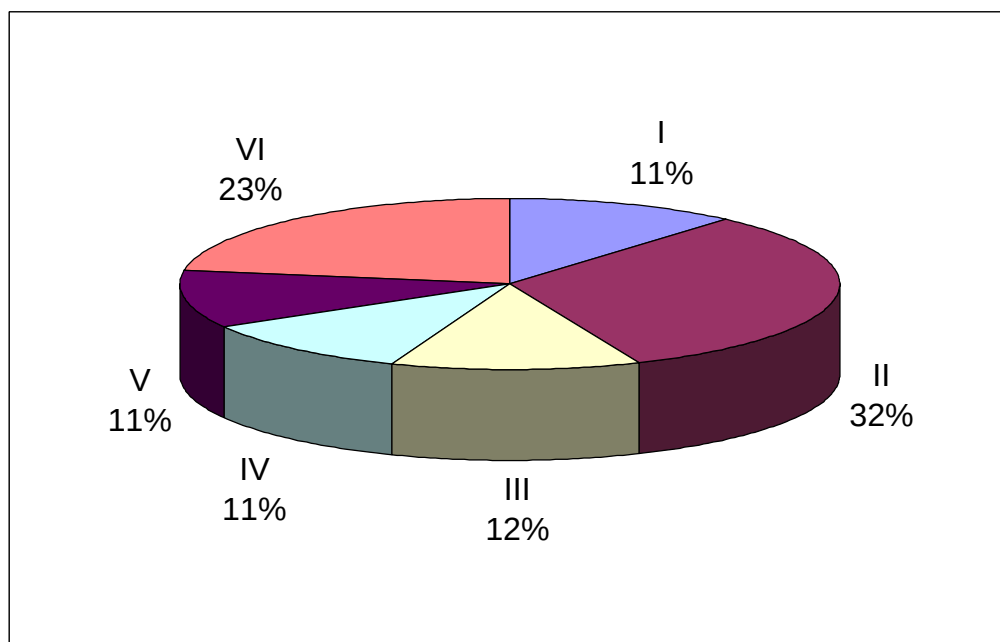


Рис. 3.9. Удельная доля профилей различных групп подверженных кромковой волнистости: I – уголок; II – швеллер; III – С-образный; IV – корытообразный; V – Z-образный; VI – специальной формы

3.4. Определение предельных углов подгибки за один переход

Влияние углов подгибки на возникновение кромковой волнистости исследовали в соответствии с методикой, изложенной в работе [165]. Для определения предельных углов подгибки при формообразовании заготовки за один технологический переход и параметров кромковой волнистости были проведены серии экспериментов с использованием станка ГПС-350М6 [19] с характеристиками, приведенными в табл. 3.11.

Исследования проводили на профилях швеллерного типа (рис. 3.10), для чего было изготовлено пятнадцать пар формирующих роликов (с углами подгибки 20, 25, 30, . . . , 85, 90°), с последующей, индивидуальной пригонкой их под каждую толщину материала. В качестве исходной заготовки для изготовления профилей и образцов использовались листы из стали 08кп (в состоянии поставки) толщиной 0,6, 0,8, 1,0, 1,2 мм. Применялись заготовки длиной 2 и 7 метров, в зависимости от вида испытания. Для каждого опыта использовалось не менее двух заготовок. Все заготовки маркировались ударным методом. Схема проведения экспериментов представлена на рис. 3.11.

Таблица 3.11

Технические характеристики станка ГПС-300М6

№ п/п	Наименование параметра и его размерность	Значение параметра
1.	Число клеток, шт	6
2.	Межклетьевое расстояние, мм	400
3.	Межосевое расстояние, мм	120...160
4.	Диаметр рабочих валов, мм	50
5.	Базовые диаметры роликов, мм	90
6.	Скорость профилирования, м/мин	8
7.	Вспомогательные устройства: Направляющее и правильное, шт.	2

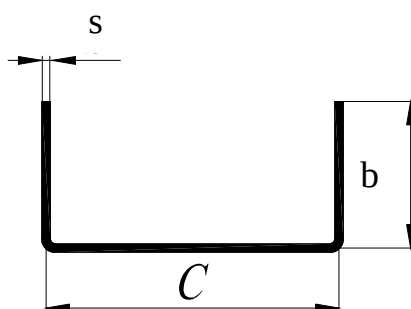


Рис. 3.10. Экспериментальный профиль базовой конфигурации:
 s – толщина материала, C – ширина донной части профиля
 ($C=100$ мм), b – высота полки профиля

Состав опытов представлен в табл. 3.12. Этапы работ и исходные данные представлены в табл. 3.13. Сочетание факторов и их уровней, при проведении экспериментов, использовали во всех возможных комбинациях.

Таблица 3.12

Исходные данные для проведения эксперимента

	s, мм	b, мм	α , град
Верхний уровень	1,2	50	60
Нижний уровень	0,6	20	20
Интервал варьирования	0,2	10	5

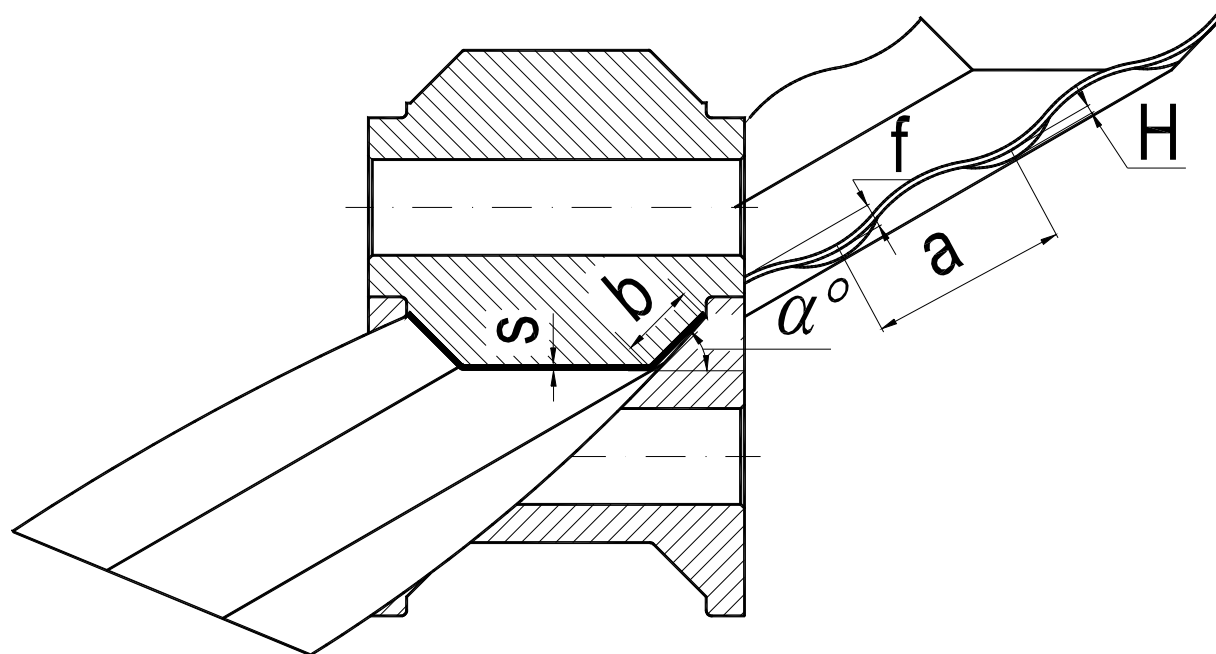


Рис. 3.11. Определение максимального угла подгибки за один переход формообразования

Заготовки (по два образца на каждый опыт) подвергали профилированию за один переход. После каждого очередного опыта заготовки подвергались выходному контролю в соответствии с разработанной методикой, и корректировался план экспериментов согласно методу Бокса-Уилсона [166].

Проведению экспериментов предшествовал анализ процессов формообразования отработанных ранее сорока восьми наиболее репрезентативных типов-размеров профилей для качественной оценки потери устойчивости их периферийных элементов в сопоставлении с используемыми режимами оборудования. Проведенный анализ способствовал более рациональному ведению экспериментов и, следовательно, минимизации их количества, а также более компетентной оценке полученных результатов.

В таблице 3.14 приведены результаты экспериментальных исследований процесса формообразования листовой заготовки за один технологический пере-

ход. По результатам проведенных экспериментальных исследований были построены соответствующие графики (рис. 3.12), иллюстрирующие влияние факторов процесса на предельные возможности формообразования [61].

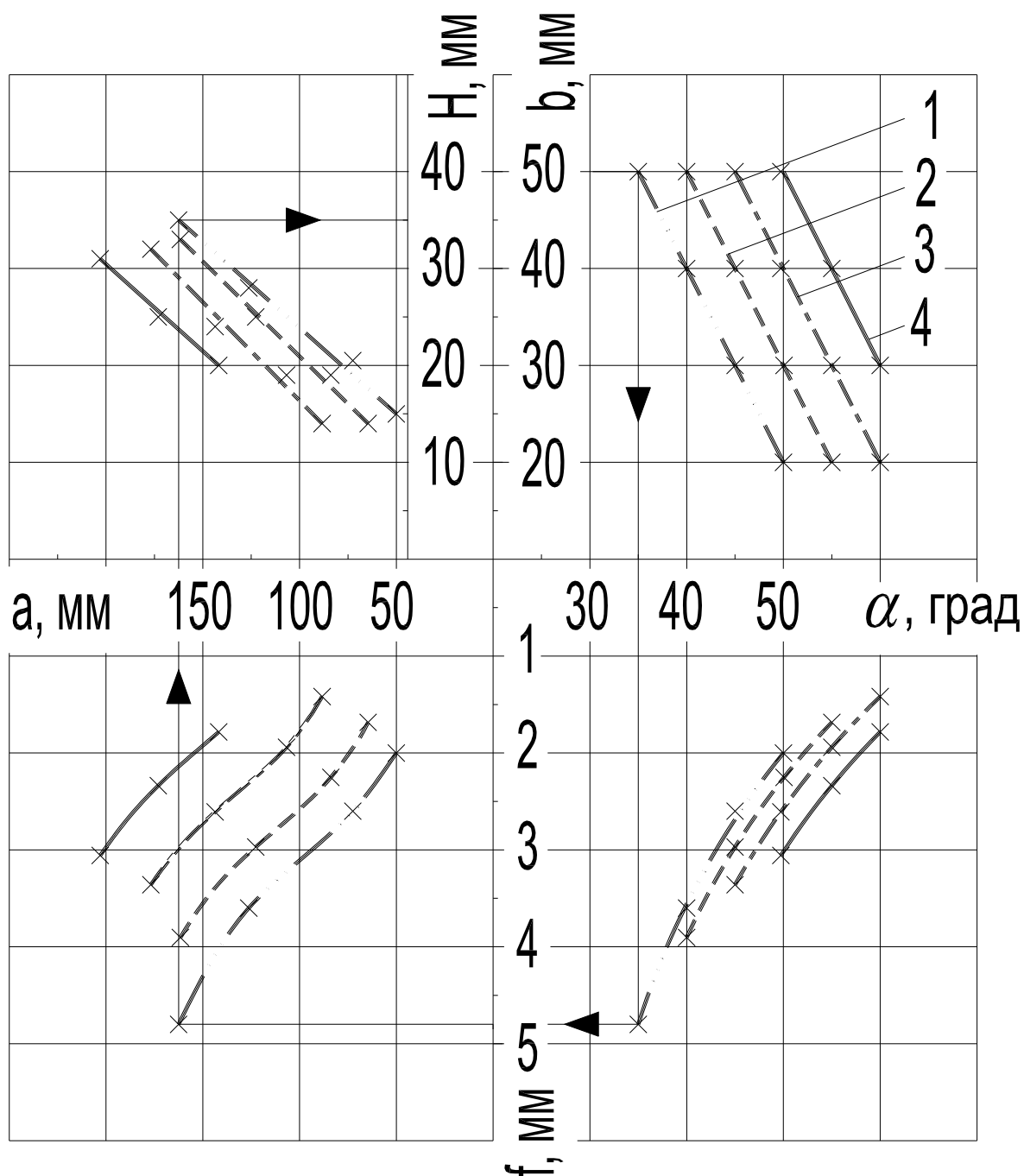


Рис. 3.12. Номограмма для определения критических углов подгибки и параметров кромковой волнистости при формообразовании заготовки за один технологический переход: $\alpha_{\text{крит}}$ – критический угол подгибки, f – амплитуда кромковой волнистости, a – период кромковой волнистости, H_p – глубина проникновения пластических деформаций; 1, 2, 3, 4 – $s = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ мм соответственно

Их анализ свидетельствует о том, что в условиях эксперимента допустимый угол подгибки увеличивается при меньших значениях высоты полки и больших значениях толщины металла. Следовательно, при разработке схем формообразования, углы подгибки элементов сечения профиля за один технологический переход следует принимать в зависимости от высоты подгибаемого участка и толщины профилируемой заготовки.

Полученные в экспериментах предельные углы подгибки могут служить в качестве оценки предельно допустимых углов подгибки. Как следует из производственного опыта, реально назначаемые углы подгибки на 30 – 40% меньше предельных (см. рис. 3.12). Наличие периферийных элементов жесткости в виде, например, отбортовок, позволяет несколько увеличивать назначаемые углы подгибки [64].

Для установления соответствия параметров кромковой волнистости уравнению (2.50) были проведены постановочные эксперименты по физическому моделированию процесса потери устойчивости полок на экспериментальном ручном прессе ПИГПЛУ-1 [167], спроектированном и изготовленном в Ульяновском государственном техническом университете (рис. 3.13). Длину заготовок брали равной межклетьевому расстоянию профилегибочного станка ГПС-300М6.

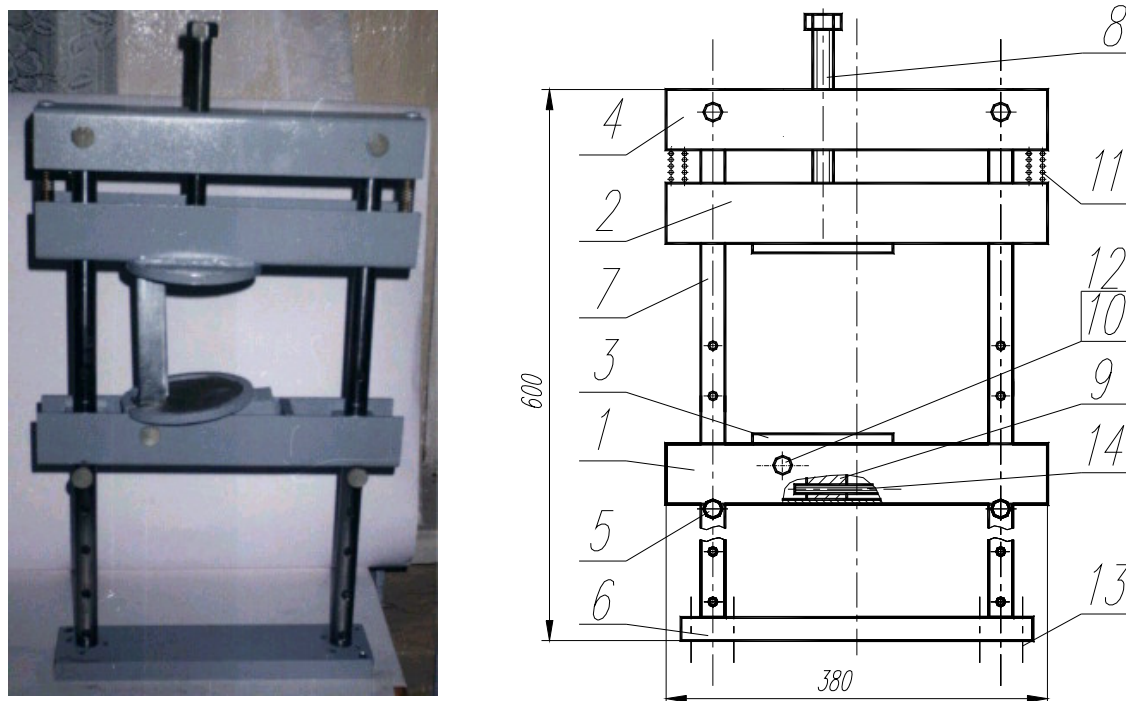


Рис. 3. 13. Экспериментальный пресс ПИГПЛУ-1: 1 – траверса регулируемая; 2 – траверса силовая; 3 – нижний установочный стол поворотный; 4 – замыкающий профиль; 5 – штифт силовой траверсы регулируемой; 6 – основание пресса; 7 – стойка – направляющая; 8 – винт нажимной; 9 – клин подвижный; 10 – штифт – ось нижнего установочного столика; 11 – пружина возвратная; 12 – шплинт штифта – оси 10; 13 – винт крепежный; 14 – винт перемещения клина регулировки угла поворота столика 3

Таблица 3.13

Состав опытов по исследованию предельных углов и кромковой волнистости

№	Содержание этапов исследований	Оборудование и инструменты	Варьируемые факторы	Зависимые параметры
1	2	3	4	5
1	Исследование предельных углов подгибки при формообразовании заготовки за один переход	Гибочно-прокатный стан ГПС-350	$S = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5$ мм $H = 20, 30, 40, 50, 60$ мм $\alpha = 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60$ град	Кромковая волнистость – наличие/отсутствие $\theta_{\text{крит}}$ – предельный угол подгибки за переход, град
2	Исследование параметров кромковой волнистости при формообразовании заготовки в закритической области	Гибочно-прокатный стан ГПС-350, универсальные измерительные средства	$S = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5$ мм $H = 20, 30, 40, 50, 60$ мм Цикл: $\alpha_{\text{крит}, i} = \alpha_{\text{крит}, i-1} + 5$ град	f – амплитуда кромковой волнистости, мм a – период кромковой волнистости, мм H_p – глубина проникновения кромковой волнистости, мм $\theta_{\text{крит}, i}$ – соответствующий угол подгибки, град

Таблица 3.14

**Результаты экспериментальных исследований
по определению предельного угла подгибки**

	Варьируемые параметры			Параметры кромковой волнистости		
	s, мм	b, мм	$\theta_{\text{крит}}$, град	f, мм	a, мм	H _p , мм
1	0,6	20	50	2,0	50	15
2	0,6	30	45	2,6	72	21
3	0,6	40	40	3,6	126	28
4	0,6	50	35	4,8	163	35
5	0,8	20	55	1,7	65	14
6	0,8	30	50	2,3	84	19
7	0,8	40	45	3,0	123	25
8	0,8	50	40	3,9	162	33
9	1,0	20	60	1,4	88	14
10	1,0	30	55	2,0	107	19
11	1,0	40	50	2,6	144	24
12	1,0	50	45	3,4	176	32
13	1,2	20	-	-	-	-
14	1,2	30	60	1,8	142	20
15	1,2	40	55	2,4	173	25
16	1,2	50	50	3,0	203	31

Испытанию подвергали 16 заготовок (по две заготовки на каждый из 8 типоразмеров) швеллерных профилей с толщиной стенок 0,6; 0,8 и 1,0 мм с шириной полок от 20 до 45 мм и шириной дна 50 мм. Оценка перемещения траверсы пресса с пересчетом к деформации в сопоставлении с параметрами кромковой волнистости показали удовлетворительное соответствие формулы (2.50) экспериментальным данным. При сравнении с параметрами кромковой волнистости из табл. 3.14 шаг и амплитуда волны имели отклонения в пределах 23 %, в то время как глубина волны имела отклонение преимущественно в большую сторону до 17 %. Это связано, по-видимому, с различием НДС в реальном процессе и моделируемом.

Отметим, что на результаты испытаний большое влияние оказывают условия на торцах профиля. При испытании профилей с толщиной стенки менее 0,6 мм их торцы следует заливать легкоплавким сплавом (например, сплавом Вуда). Наличие возможности изменения угла ориентации поворотного стола обеспечивает имитацию приложения момента и сжатия профиля, аналогично условиям, в которых находится заготовка в межклетьевом пространстве при реальном процессе профилирования.

3.5. Оценка деформаций подгибаемых полок

3.5.1. Косвенный метод оценки деформаций полок

Экспериментальное исследование деформаций подгибаемых полок вызывает известные трудности в связи с малостью пластических деформаций (в пределах 1 %). Тензометрирование дает существенные погрешности в связи с продольным изгибом заготовки, кроме того, исследования требуют выреза кольцевых пазов в роликах, что искажает реальный процесс формообразования. Метод сеток и метод отверстий также не приводят к удовлетворительным результатам из-за малости деформаций.

Наиболее приемлемым методом оценки деформаций полок является регистрация продольной кривизны профиля (по выходу его из текущей клетки при условии отсутствия последующих клеток) с пересчетом ее к максимальной деформации полок по формулам (2.43) – (2.45).

На рис. 3.14 представлена схема проведения экспериментальных исследований при формообразовании профилей швеллерного типа из мягких оцинкованных сталей, в которых варьируемыми факторами были толщина заготовки, углы подгибки за переход в третьем и пятом переходах, а в качестве параметра регистрировали стрелу прогиба профиля на заданной базовой длине после третьего перехода (в отсутствие последующих клеток) и после окончательного перехода в отсутствие правильного устройства. Эксперименты проводили на профилях шириной 50 и 195 мм с шириной полки 45 мм на заготовках толщиной 0,6; 0,8 и 1,0 мм с использованием базовых углов подгибки полок согласно работе [153]. Значения суммарных углов подгибки α_k указаны в верхней части рис. 3.14. Длина заготовок составляла 2200 мм.

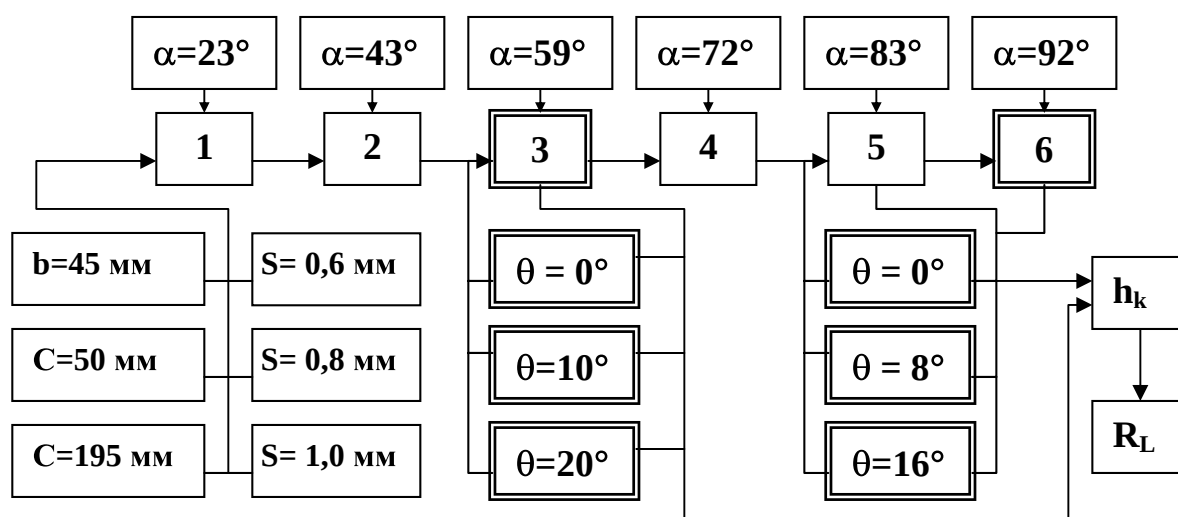


Рис. 3.14. Схема проведения экспериментальных исследований

Варьируемые факторы выбирали из соображений целесообразности для обобщения результатов на разработку технологии формообразования 32 про-

филей для фирмы «ИНСИ» (г. Челябинск). Применяли сборную оснастку (рис. 3.15) для заявленной номенклатуры профилей с целью ее последующего использования в производственных условиях. Исключение составляли четыре пары боковых конусов сборных роликов для изучения влияния промежуточных углов (см. рис. 3.14). Ширина полки не изменялась по следующим причинам: во-первых, номенклатура профилей, подлежащих изготовлению, содержала только указанную выше ширину полки; во-вторых, для установления условий локальной потери устойчивости профиля существенное значение имеет относительная ширина полки, а не абсолютная.

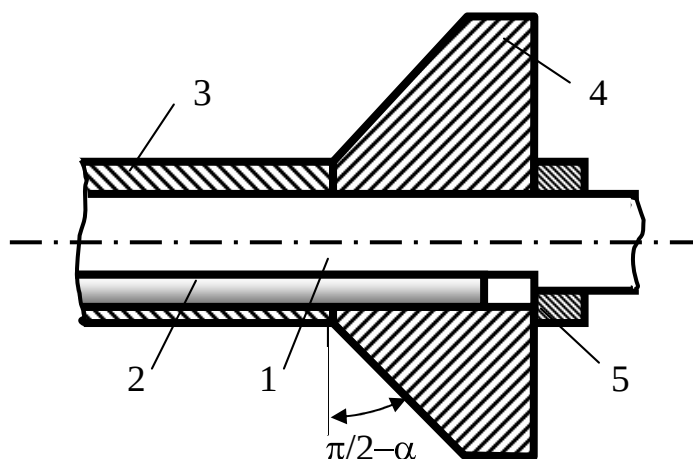


Рис. 3.15. Сборная оснастка для проведения экспериментов:
1 – вал станка; 2 – шпонка; 3 – базовая деталь ролика;
4 – гибочный конус; 5 – упорная втулка

При проведении экспериментов использовали гибочно-прокатный станок ГПС-300М6 и необходимое количество пар формирующих валков, которые устанавливали на валы последних клеток при демонтированном правильном устройстве. В качестве направляющего устройства применяли свободную клетку с установкой на ее рабочие валы гладких роликов. Использование последних клеток обусловлено соображениями обеспечения свободного выхода двухметрового профиля, имеющего некоторую продольную кривизну.

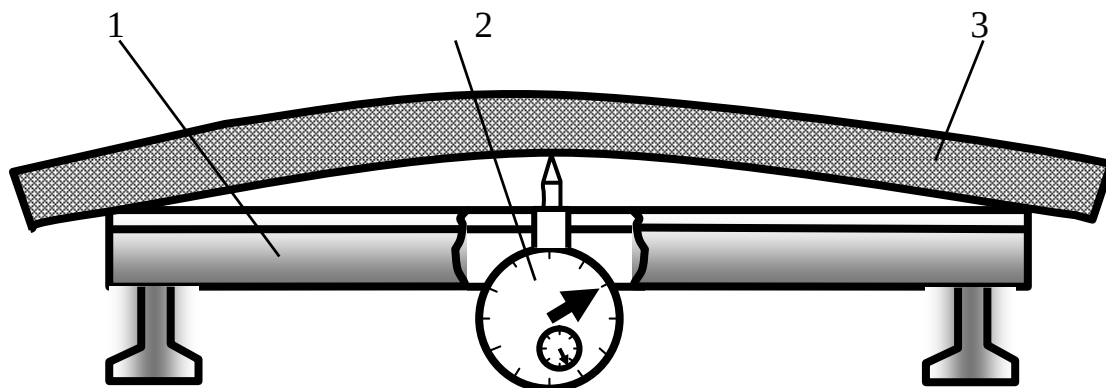


Рис. 3.16. Стойка для измерения прогибов профиля:
1 – стойка; 2 – индикатор часового типа; 3 – профиль

Измерение прогибов профиля определяли на стойке (рис. 3.16) с базой 1000 мм, снабженной индикатором часового типа. Для уменьшения погрешности из-за влияния концевой участка профиля контролировали изменение прогибов по длине профиля их троекратным измерением при продольном перемещении профиля по стойке. Разброс величины прогибов для профилей толщиной 0,6 и 0,8 мм не превышал 0,12 мм, а профилей толщиной 1,0 мм – 0,16 мм. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.15.

В соответствии с формулами (2.43) – (2.45) с использованием пакета MathCAD – 2001 Pro выполнен рис. 3.17 для пересчета прогибов профиля к продольным деформациям полок. Ввиду сложности напряженно-деформированного состояния заготовки в роликовом калибре возможны некоторые отличия полученных из эксперимента деформаций и реальных деформаций полок в свободной и контактной зонах, тем не менее установленные деформации вполне соизмеримы с расчетными деформациями подгибаемых полок (см., например, рис. 2.11 и 2.21). Кроме того, анализ табл. 3.15 подтверждает, что ширина донной части профиля оказывает влияние на деформационные параметры полок и, соответственно, на число переходов (ср. значения прогибов для ширины дна 50 и 195 мм; см. также разд. 2.7 и 3.2).

Таблица 3.15

Зависимость прогиба профиля от углов подгибки

Толщина, S_0 , мм	Ширина дна C , мм	Стрела прогиба h_k в мм при углах подгибки за переход θ , измеренных в градусах					
		0	10	20	0	8	16
0,6	50	0,46	2,44	3,26*	0,62	2,84	3,16
	195	0,34	1,26	3,04*	0,44	1,72	2,22
0,8	50	0,52	2,60	3,42	0,50	2,38	3,96
	195	0,40	1,72	2,54*	0,32	2,06	2,84
1,0	50	0,44	2,14	3,48	0,38	2,44	4,10
	195	0,28	1,64	2,74	0,32	1,92	3,42
Суммарный угол гиба α в градусах		43	53	63	72	80	88
Номер конечного перехода		3	3	3	5	5	5

* – склонность к «развалу»

3.5.2. Измерение твердости полок профиля по методу Виккерса

Для оценки уровня накопленной деформации элементов профиля производили измерение их твердости. Образцы вырезали из соответствующих участков швеллерных профилей 50x50x1,5 мм из стали 3 и 110x45x0,6 мм из стали 08кп, заливали в легкоплавкий сплав, производили их шлифование, а затем производили измерения на приборе ПМТ-3 по стандартной методике по методу Виккерса. На образцах первого профиля производили замеры твердости исход-

ной заготовки (что соответствует нулевому переходу на рис. 3.18) и боковой поверхности полок на расстоянии 4 – 6 мм от кромки после каждого из переходов. Замеры производили тоекратно с последующим усреднением и определением среднеквадратичной ошибки в среде EXCEL 97.

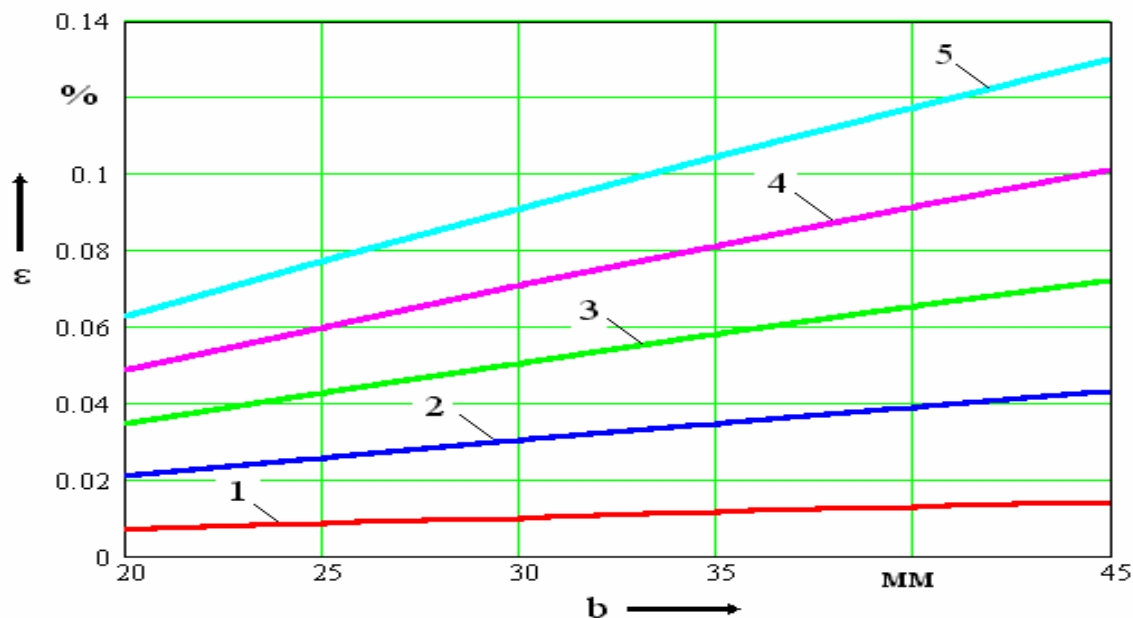


Рис. 3.17. График пересчета прогибов профиля h к деформациям полки: 1, 2, 3, 4, 5 – $h = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5$ мм соответственно

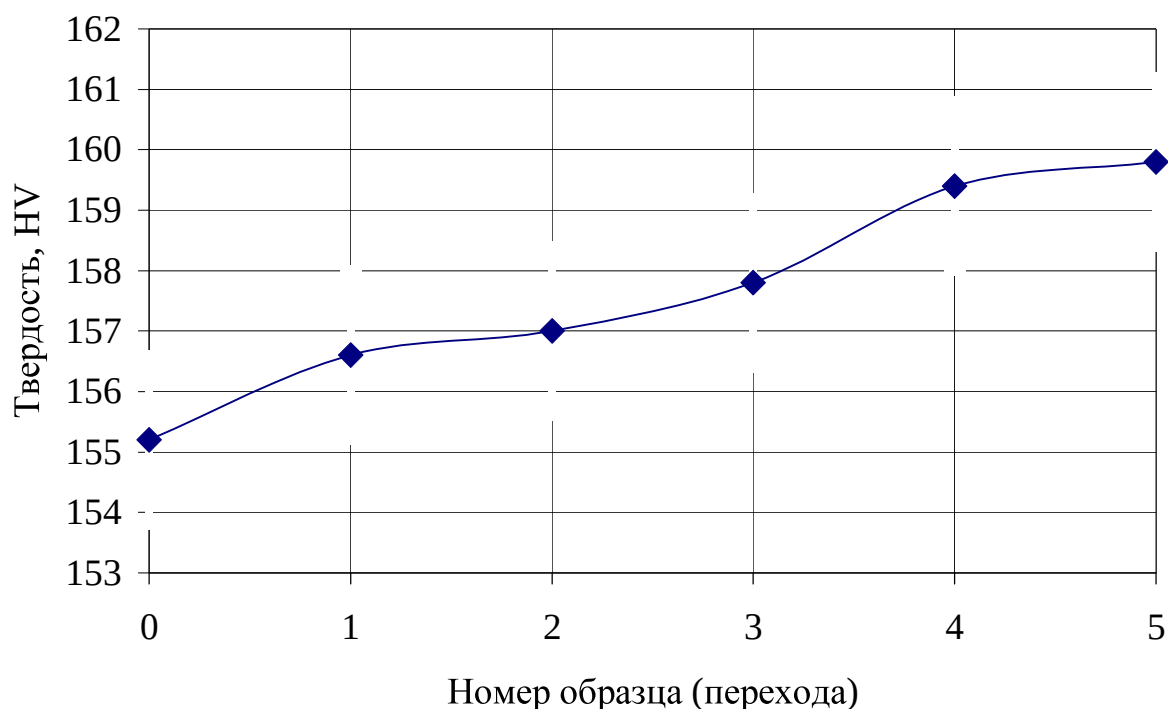


Рис. 3.18. Твердость полки профиля 50x50x1,5 из ст 3

Показанные на рис. 3.18 значения твердости, свидетельствуют о том, что хотя и наблюдается тенденция твердости к росту с номером перехода, однако

это изменение не является значительным. Большую часть эффекта упрочнения скорее следовало бы отнести на счет сгиба и разгиба полки в межклетьевом пространстве, чем на продольное растяжение. Малое упрочнение подтверждает, что деформации полок при формообразовании профиля незначительны.

Для второго профиля производили замеры твердости полок в нижней и верхней части полки после каждого перехода, дна профиля после окончательного перехода, а также исходной заготовки. Партия образцов, подвергнутых измерениям, показана на рис. 3. 19.

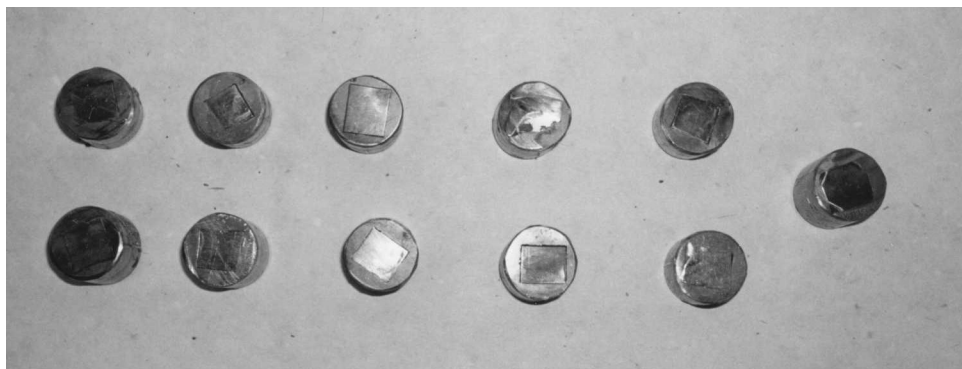


Рис. 3.19. Образцы элементов профиля 110x45x0,6 мм

Результаты измерений приведены на рис. 3.20. Здесь буквы «н» и «в» при номере перехода относятся к нижней и верхней части полки соответственно. Как и в предыдущем случае, здесь также можно видеть тенденцию твердости к росту с увеличением номера перехода. Причем, наблюдается регулярность в соотношениях твердости нижней и верхней частей полки. Относительно большой разброс значений твердости и ее слабое изменение дают основание ограничиться лишь качественным анализом тенденций изменения твердости и не прибегать к количественным связям твердости и интенсивности деформаций [168]. Повышение твердости к последнему переходу составляет, как видно из рис. 3.18 и рис. 3.20, величину порядка 3 – 4 %.

В работе [169] показано, что твердость в зоне сгиба заготовки существенно увеличивается в зависимости от схемы формообразования (маршрута подгибки), причем увеличение твердости с углом подгибки становится менее выраженным при уменьшении толщины заготовки. К сожалению, данные по твердости подгибаемых полок в этой работе отсутствуют, как, впрочем, и ссылки на ширину подгибаемой полки и используемый материал. Для схем стесненного изгиба вопрос изменения твердости элементов профиля достаточно хорошо изучен в работе [63]. Анализ распределения твердости по внешней поверхности готового корытного профиля [63] показывает, что на подгибаемой полке увеличение твердости составляет до 5 %, в то время как твердость донной части и исходной заготовки практически совпадают. Увеличение твердости в уголко-вой зоне превышает 15 %. Близость оценок изменения прочности в указанных работах свидетельствует о невысоком уровне деформаций подгибаемых полок.

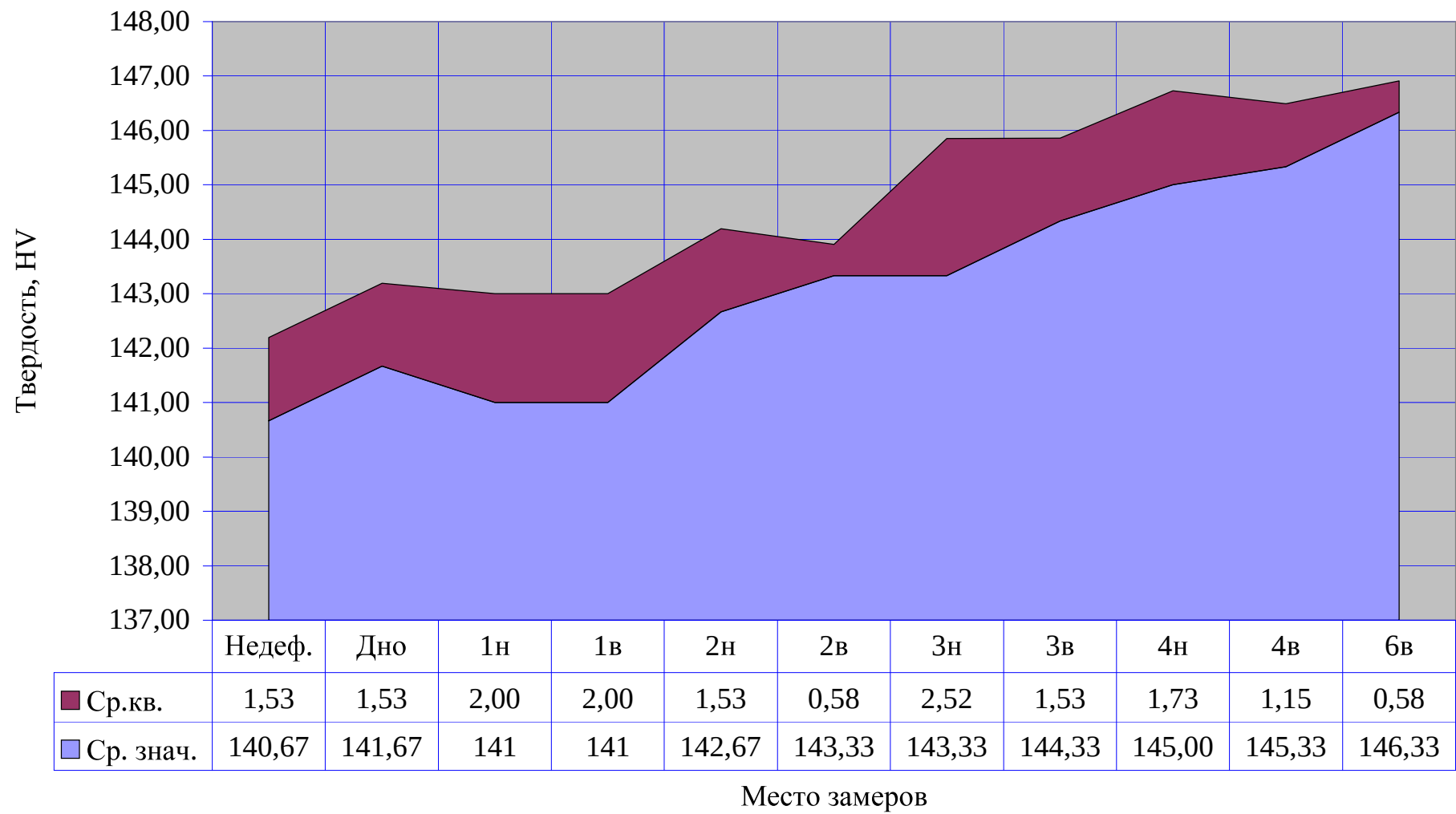


Рис. 3.20. Твердость элементов профиля по Виккерсу

3.6. Анализ эмпирического числа переходов

Для верификации модели числа переходов (см. раздел 2.7) из журналов технологической отработки профилей производились выборки профилей, изготовленных без применения специальных способов. Количество представителей в выборках составляло 9, 12, 10 и 11 для уголкового, швеллерного, корытного и С – образного типов профилей соответственно.

Факторами являлись толщина заготовки S , ширина подгибаемой полки b , внутренний радиус зоны сгиба r_B , ширина дна C , ширина горизонтальной полки g , а зависимой случайной величиной (результативным признаком) – число переходов N .

Для каждого типа профилей строились частные регрессионные модели с помощью опции "Регрессия" из "Пакета анализа" прикладной программы Microsoft Excel 2000 (эти работы выполнены д.т.н В.Н. Клячкиным). При построении моделей придерживались определенной последовательности [170]:

- 1) Задание аналитической формы уравнения регрессии и определение параметров регрессии.
- 2) Определение степени стохастической взаимосвязи результативного признака и факторов, проверка качества уравнения регрессии.
- 3) Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии.

Аналитическую форму уравнений регрессии задавали в аддитивной форме. При этом линейные размеры поперечного сечения профиля относили к толщине заготовки. Для каждой модели результаты расчета по пп. 1) – 3) выводились в виде отчетов регрессионной статистики, дисперсионного анализа и оценки значимости коэффициентов регрессии. Стандартными критериями значимости модели и коэффициентов в пакете являются критерии Фишера и t – распределение Стьюдента соответственно [170].

Получены следующие уравнения регрессии:

- 1) Уголкового профиля

$$N = 0.872 \cdot s^{0.27} \cdot \left(\frac{b}{s}\right)^{0.364} \cdot \left(\frac{r_B}{s}\right)^{0.508} \quad (3.1)$$

- 2) Швеллерный профиль

$$N = 1.734 + 0.0533 \cdot \frac{b}{s} + 1.25 \cdot \frac{r_B}{s} - 0.008 \cdot \frac{C}{s} \quad (3.2)$$

- 3) Корытный профиль

$$N = 0.534 \cdot s^{0.482} \cdot \left(\frac{b}{s}\right)^{0.525} \cdot \left(\frac{g}{s}\right)^{0.145} \quad (3.3)$$

4) С – образный профиль

$$N = 1.022 \cdot s^{0.313} \cdot \left(\frac{b}{s}\right)^{0.464} \cdot \left(\frac{r_B}{s}\right)^{0.336} \quad (3.4)$$

Попытка построения гибридной модели для всех четырех типов профилей оказалась неудачной, что связано, по-видимому, с разнородностью исходных данных. Модели (3.1) – (3.4) значимы; факторы, не входящие в модели, но объявленные данному типу профиля, оказались незначимыми и были отброшены.

Для сравнения эмпирических моделей с гибридной полуэмпирической моделью (2.55) и опытными данными на рис. (3.21) – (3.24) представлены полученные результаты. В качестве основного аргумента выбрана ширина полки – важнейший геометрический параметр сечения профиля, определяющий до известной степени число переходов при профилировании. Тенденция изменения числа переходов с ростом ширины полки совпадает с моделью (2.55), причем, графики, относящиеся к уголкового и С – образному профилям имеют характер кривых насыщения, что также согласуется с гибридной моделью (2.55).

Для корытного профиля отличие полуэмпирической модели от экспериментальной модели составляет порядка 20% (рис. 3.23). Вероятнее всего, это можно отнести на счет «перестраховки» разработчиков оснастки и существовавшую традицию. Опыт работы автора показывает, что профили с указанными размерами могут быть изготовлены за 5 – 6 переходов.

Нормировку гибридной модели проводили при средних значениях диапазонов варьирования факторов на усредненное число переходов.

Следует указать на ограниченность данных по «чистым» схемам и режимам формообразования, в связи с чем, например, для того же рис. 3.23 уровень значимости для факторов был взят равным 0,08, что свидетельствует о несколько недостаточном уровне репрезентативности исходных данных. С этим недостатком связан и характер зависимости числа переходов от радиусагиба в частных экспериментальных моделях.

Небольшой срок использования гибридной модели в практике проектирования оснастки показал ее хорошие прогностические возможности. Надлежит отметить, что расчетное число переходов, полученное из гибридной модели (2.55), следует округлять в сторону превышения, если дробная часть величины числа переходов превосходит 0,3.

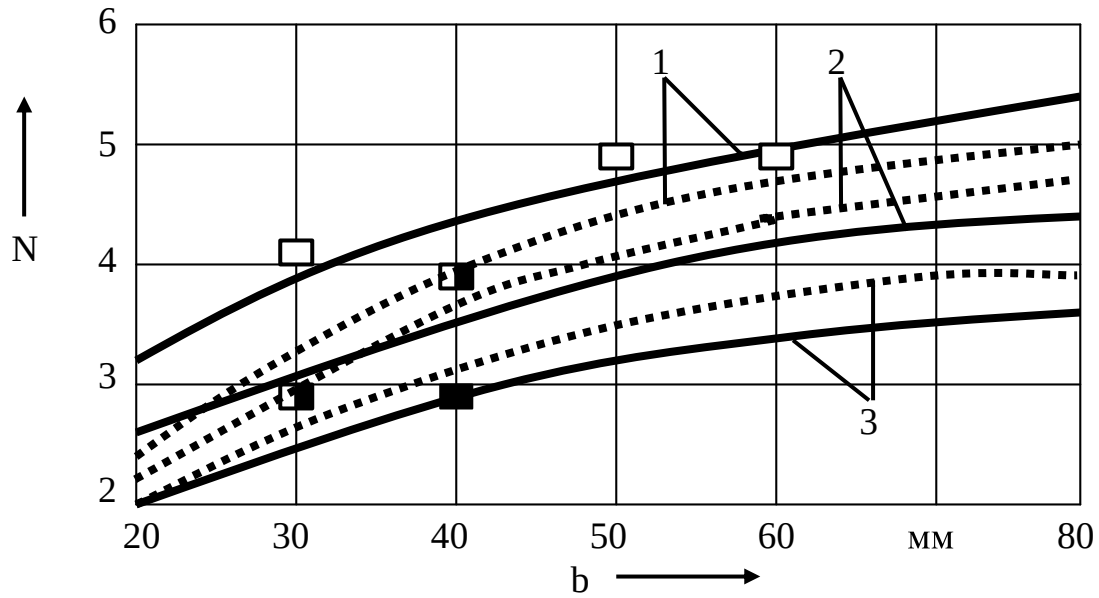


Рис. 3.21. Число переходов для углового профиля:

— — частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 □, ◐, ■ — эксперимент при $s = 0,6; 1,0; 1,5$ мм соответственно для 1, 2, 3

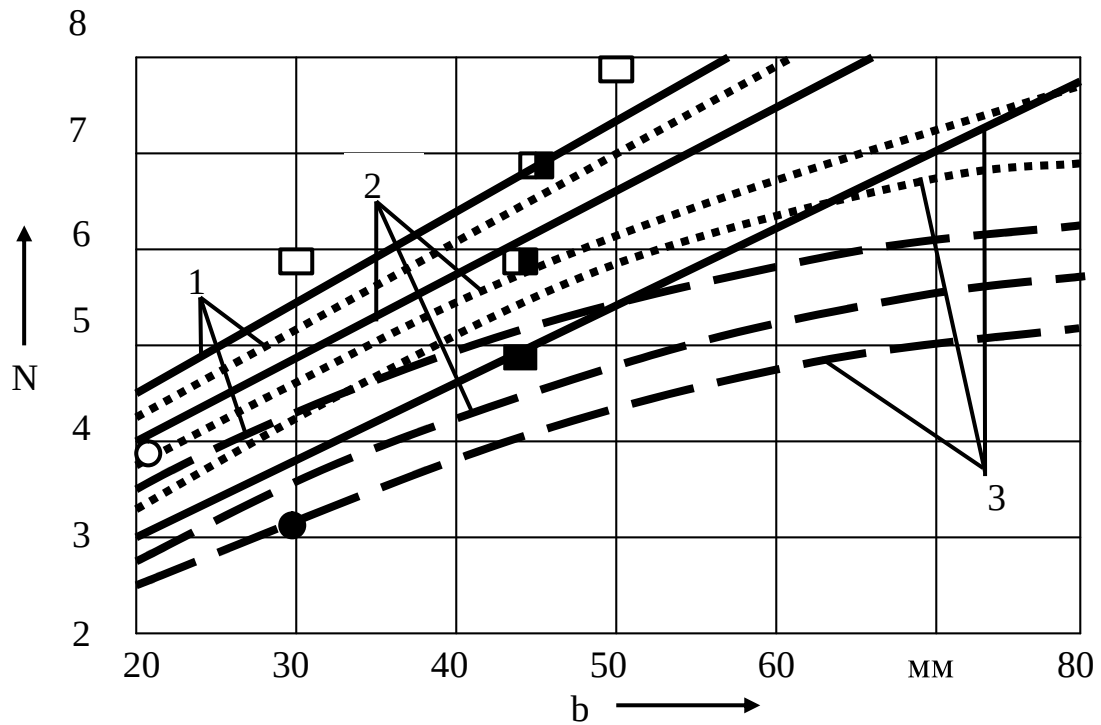


Рис. 3.22. Число переходов для швеллерного профиля:

— — частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 □, ◐, ■ — эксперимент при $C = 30; 100; 200$ мм ($s = 0,6$ мм) соответственно для 1, 2, 3;
 — — полуэмпирическая модель при $C = 30; 100; 200$ мм ($s = 1,0$ мм) соответственно для 1, 2, 3;
 ○, ● — эксперимент при $s = 1,0$ мм для $C = 15; 30$ мм соответственно

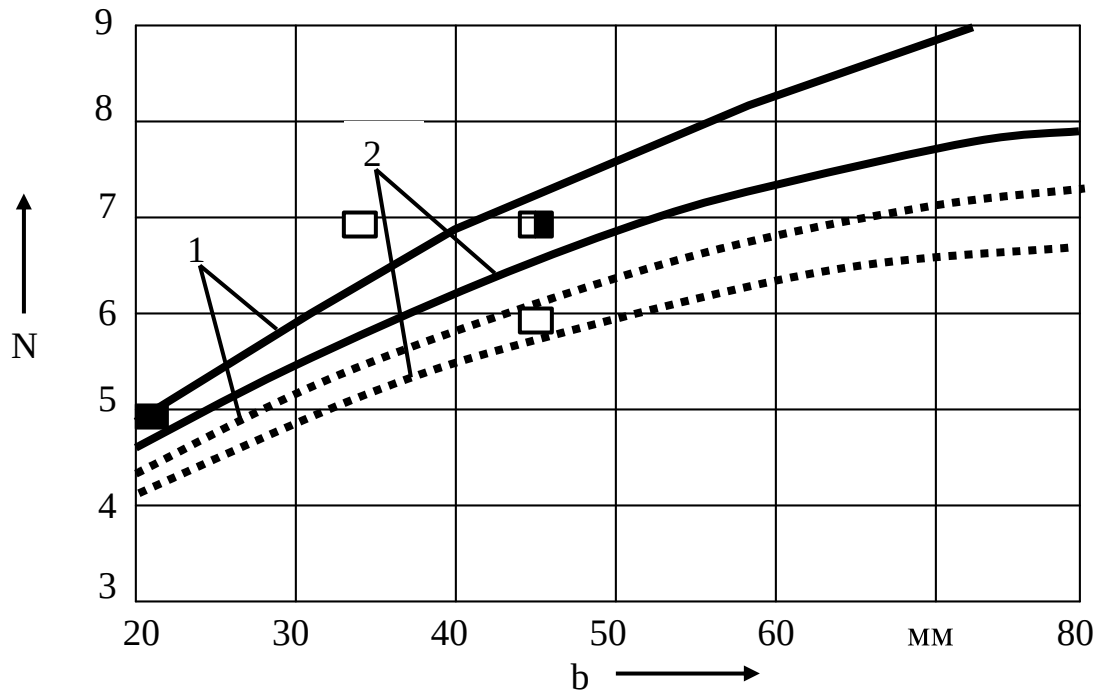


Рис. 3.23. Число переходов для корытного профиля:

— частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 $\square$, $\blacksquare$ — эксперимент при $g = 10$; 20 мм ($s = 0,6$ мм) соответственно для 1;
 $\blacksquare$ — эксперимент при $g = 15$ мм ($s = 1,0$ мм) для 2;

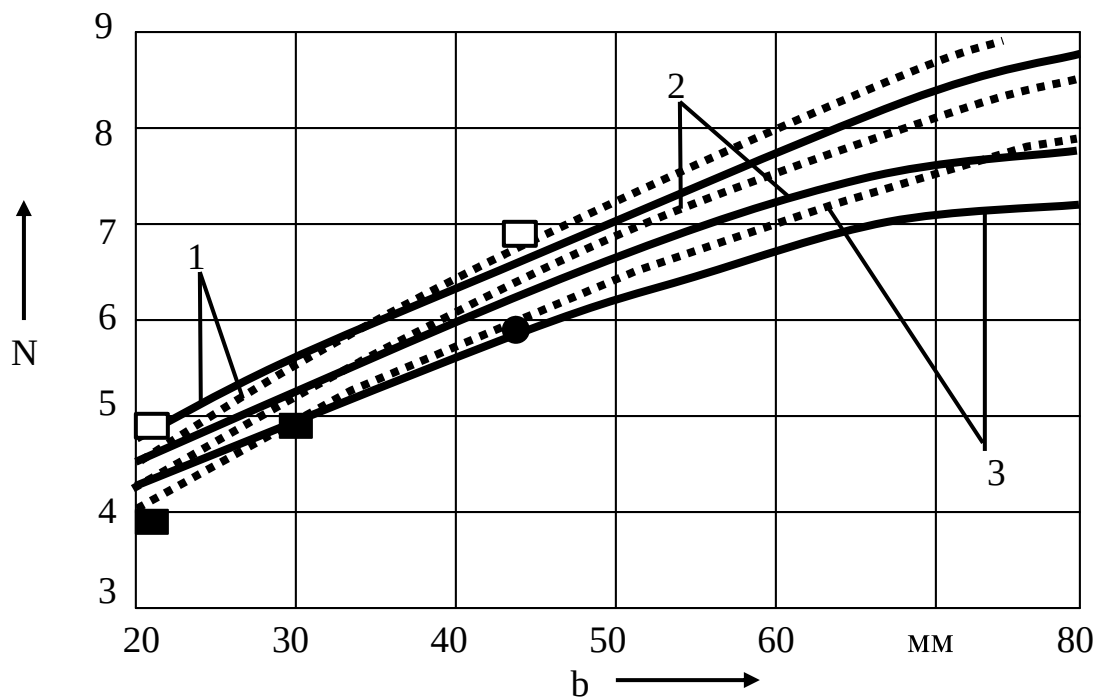


Рис. 3.24. Число переходов для С – образного профиля:

— частная эмпирическая модель; — полуэмпирическая модель;
 $\square$, $\bullet$, $\blacksquare$ — эксперимент при $s = 0,6$; 1,0; 1,5 мм соответственно для 1, 2, 3

Выводы

Протяженность зоны плавного перехода швеллерного профиля с точностью до 10 % совпадает с теоретической моделью. Подтвержден «эффект желобчатости» для профилей с широкой донной частью, учет которого при проектировании процесса позволяет уменьшить число переходов.

Статистические исследования результатов технологических отработок профилей позволили выделить в качестве основного ограничения кромковую волнистость и установить область ее проявления для четырех типов профилей.

Установленная зависимость подгибки за один переход от толщины и ширины заготовки позволяет установить предельно допустимые углы подгибки. В закритической области характер экспериментальных зависимостей параметров кромковой волнистости от технологических факторов хорошо согласуются с теоретическими моделями и критериями кромковой волнистости.

Оценка деформаций полок косвенным методом и с помощью измерения твердости показывает их удовлетворительное совпадение с результатами теоретических расчетов и данными других авторов.

Сравнение частных экспериментальных моделей, самих экспериментальных данных и полуэмпирической гибридной модели числа переходов показывает их удовлетворительное соответствие (в пределах 20 %). Исключение составляет зависимость числа переходов от радиусагиба, что связано с издержками репрезентативности выборок анализируемых профилей.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ

Минимальное число переходов, используемое при формообразовании профиля, является одним из основных показателей рациональности выбранного метода его изготовления.

На основе результатов исследований формообразования типовых профилей возможно создание стандартной процедуры проектирования технологии производства таких профилей. Метод интенсивного деформирования позволяет изготавливать и более сложные профили (до 12 зон сгиба) за 4 – 8 переходов.

В данном разделе по ряду вопросов проектирования технологии сделаны обобщения на номенклатуру сложных профилей, проистекающие из накопленного авторами опыта проектирования оснастки и отладки технологии. В качестве основного оборудования принят универсальный гибочно-прокатный станок типа ГПС [164].

4.1. Этапы проектирования технологического процесса формообразования профилей в роликах

Проектирование технологии изготовления профилей осуществляется обычно поэтапно, в следующей последовательности:

- 1) Проработка чертежа профиля на технологичность.
- 2) Расчет ширины исходной заготовки.
- 3) Определение энергосиловых параметров процесса.
- 4) Выбор оборудования.
- 5) Выбор расположения профиля по отношению к осям основных валков.
- 6) Выбор основной оси профиля.
- 7) Выбор схемы и режимов формообразования.
- 8) Определение углов подгибки элементов профиля.
- 9) Расчет технологических переходов формообразования для интенсивного деформирования.
- 10) Проектирование инструмента.
- 11) Оформление конструкторской и технологической документации.
- 12) Разработка режимов настройки оборудования.

Приведенные этапы проектирования технологии и их последовательность характерны для разработки технологии типовых мелкосортных профилей.

При проработке на технологичность чертежа профиля руководствуются общими требованиями технологичности [171], предъявляемыми к конструкции изделия с учетом особенности процесса формообразования.

Ширину исходной заготовки определяют теоретически по соответствующим зависимостям с её последующим уточнением при отработке профиля.

Выбор оборудования редко связывают с расчетом энергосиловых параметров процесса, а в качестве основного параметра используют число клеток, определяемое из опыта.

Опыт разработчика определяется выбор и других параметров: расположения профиля в валках, форма и положение основной оси профиля, углов подгибки и т.д.

Окончательный переход формообразования составляется по чертежу профиля, с учетом пружинения [33].

Описанный процесс проектирования технологии не является оптимальным, часто приводит к ошибкам, устраняемым при отработке технологии. Новая проектная процедура разработки технологии для интенсивного деформирования приведена в разделе 4.13.

4.2. Технологичность изготовления профилей методом интенсивного деформирования

Оценка технологичности профиля может производиться на двух стадиях: на стадии проектирования изделия и на стадии технологической подготовки производства профиля данного типоразмера [172].

Для разработки технологии важными являются: форма профиля, параметры его поперечного сечения, материал, требования к качеству профиля. Указанные признаки являются интегральными показателями, которые в структурированном виде представлены схемой рис. 4.1.

Общие технологические требования к конструкции деталей подлежащих изготовлению методом интенсивного деформирования формулируются следующим образом:

- 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.;
- необходимо уменьшать ассортимент применяемых толщин листового материала (предпочтительный ряд толщин: 0,6; 0,8; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5 мм);
- необходимо учитывать, что конструкция профиля открытого типа более предпочтительна, чем конструкция профиля закрытого и полузакрытого типов;
- допуски на размеры поперечного сечения профилируемых деталей должны соответствовать точности процесса профилирования (10 – 14-й квалитет). Допуск на длину детали нецелесообразно назначать менее ± 2 мм;
- необходимо избегать сложных конфигураций перфорированных отверстий с узкими и длинными вырезами ($b > 2s$);
- расстояние между перфорированными отверстиями не должно быть менее $(2 \div 3)s$;
- расстояние от края перфорированного отверстия до края профилируемой полосы не должно быть менее $(3 \div 5)s$;
- суммарная площадь перфорированных отверстий в поперечном сечении профилируемой полосы не должна превышать 50 – 70% от площади заготовки в поперечном сечении;
- необходимо учитывать, что минимально допустимые внутренние радиусы гибки составляют, как правило, $0,5s$ и назначать их следует только при конструктивной необходимости;
- необходимо учитывать, что минимально допустимая высота отбортовок составляет, как правило, $2s$ и назначать минимальные значения следует только при конструктивной необходимости.

Для формализации анализа технологичности целесообразно редуцировать совокупность исходных сведений о профиле данного типоразмера к минимальному набору идентификаторов, учитывающих его особенности.

4.3. Расчет ширины заготовки

Ширина заготовки для профилирования является важным технологическим параметром. Ширину исходной заготовки определяют по длине нейтрального слоя, который, не подвергается деформации от изгиба.



Рис. 4.1. Исходные данные по профилю

Известно достаточно большое количество методик по определению ширины исходной заготовки для традиционного профилирования, при котором нейтральный слой напряжений (НСН) смещается в сторону сжатых волокон, что приводит к утонению металла в зоне сгиба [22, 33, 58].

Для стесненного изгиба характерно утолщение металла в зоне сгиба, при этом НСН смещается в сторону наружных растянутых волокон. Методика расчета ширины исходной заготовки для стесненного изгиба изложена в работе [173].

При применении метода интенсивного деформирования НСН не изменяет своего начального положения (рис. 4.2), поэтому радиус нейтрального слоя можно определить по формуле:

$$\rho = r + \frac{s}{2}, \quad (4.1)$$

где r – внутренний радиус гибки, мм; s – толщина заготовки, мм.

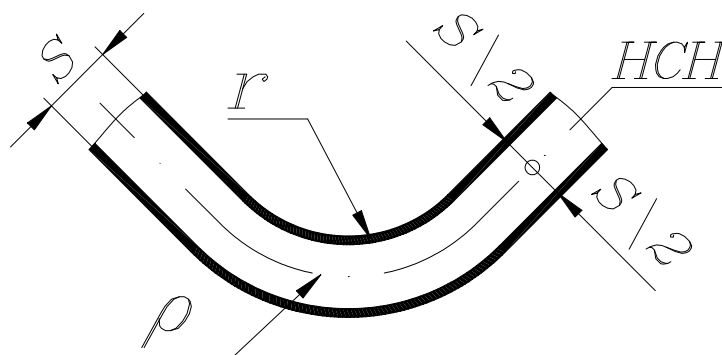


Рис. 4.2. Положение нейтрального слоя напряжений в уголко́вой зоне профиля при реализации метода интенсивного деформирования

Для определения ширины исходной заготовки $B_{\text{заг}}$ по средней линии, при которой можно получать профили с заданным внутренним радиусом r , производим разбиение поперечного сечения на отдельные прямолинейные и криволинейные элементы (рис. 4.3).

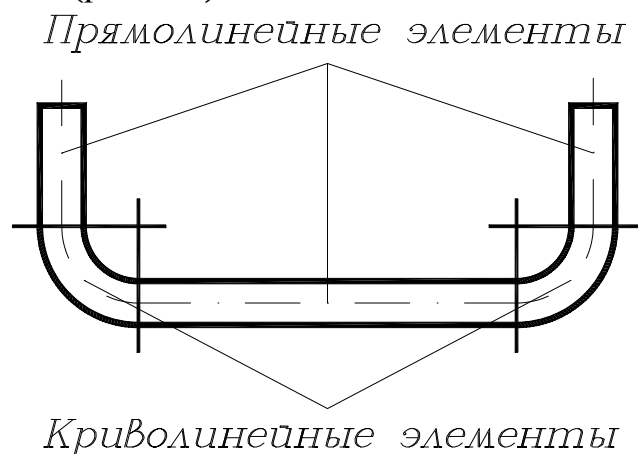


Рис. 4.3. Разбиение поперечного сечения профиля на элементы

Общая длина развертки поперечного сечения профиля по средней линии при многоугольной гибке определяется так:

$$B_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n (B_{\text{пр}})_i + \sum_{i=1}^n (B_{\text{кр}})_i, \quad (4.2)$$

где $\sum_{i=1}^n (B_{\text{пр}})_i$ – сумма длин прямолинейных участков, мм;

$\sum_{i=1}^n (B_{\text{кр}})_i$ – сумма длин криволинейных участков, мм.

Сумма длин криволинейных участков можно определить по следующей зависимости:

$$\sum_{i=1}^n (B_{\text{кр}})_i = \sum_{i=1}^n \frac{\pi \alpha_i}{180^\circ} \left(r_i + \frac{s}{2} \right), \quad (4.3)$$

С использованием формул (4.1) – (4.3) ширину исходной заготовки определяют по формуле:

$$B_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n (B_{\text{пр}})_i + \sum_{i=1}^n \frac{\pi \alpha_i}{180^\circ} \left(r_i + \frac{s}{2} \right) \quad (4.4)$$

Полученная формула (4.4) хорошо зарекомендовала себя в производственных условиях при отработке технологического оснащения и изготовлении партий гнутых профилей методом интенсивного деформирования.

4.4. Выбор расположения профиля по отношению к осям основных валков

Расположения профиля в основных валках профилегибочного стана во многом определяет оптимальность технологических параметров процесса. Перед разработкой технологических схем формообразования, определением углов подгибки элементов профиля по переходам и проектированием инструмента необходимо выбрать оптимальное расположение профиля по отношению к основным валкам. При этом следует руководствоваться:

- возможностью получения формы и размеров профиля;
- обеспечением требуемого качества поверхности профиля (особенно для декоративных, облицовочных профилей);
- возможностью получить качественный профиль за минимальное количество переходных форм;
- возможностью осуществления последующих технологических операций (резка, пробивка отверстий, сварка и т. д.);
- обеспечением простоты наладки и удобством наблюдения за процессом профилирования.

Целесообразно при выборе положения профиля в основных валках стремиться расположить профиль таким образом, чтобы обеспечить минимальную глубину вреза в валки. Как правило, это достигается за счет расположения

профиля большим размером вдоль осей валков. Необходимо также обеспечить возможность правки профиля для гарантии получения прямолинейности и отсутствия скручивания профиля вокруг продольной оси. При этом необходимо учитывать то, что при достаточно больших деформациях задаваемых в правильном устройстве может происходить изменение угловых размеров профиля, возникать кромковая волнистость и происходить нарушение поверхности профиля в виде задиров, царапин и т. д. В связи с этим целесообразно располагать профиль в валках таким образом, что бы по выходу из последней пары формирующих валков он имел минимальные поводки.

Рассмотрим конкретный пример выбора расположения профиля по от-

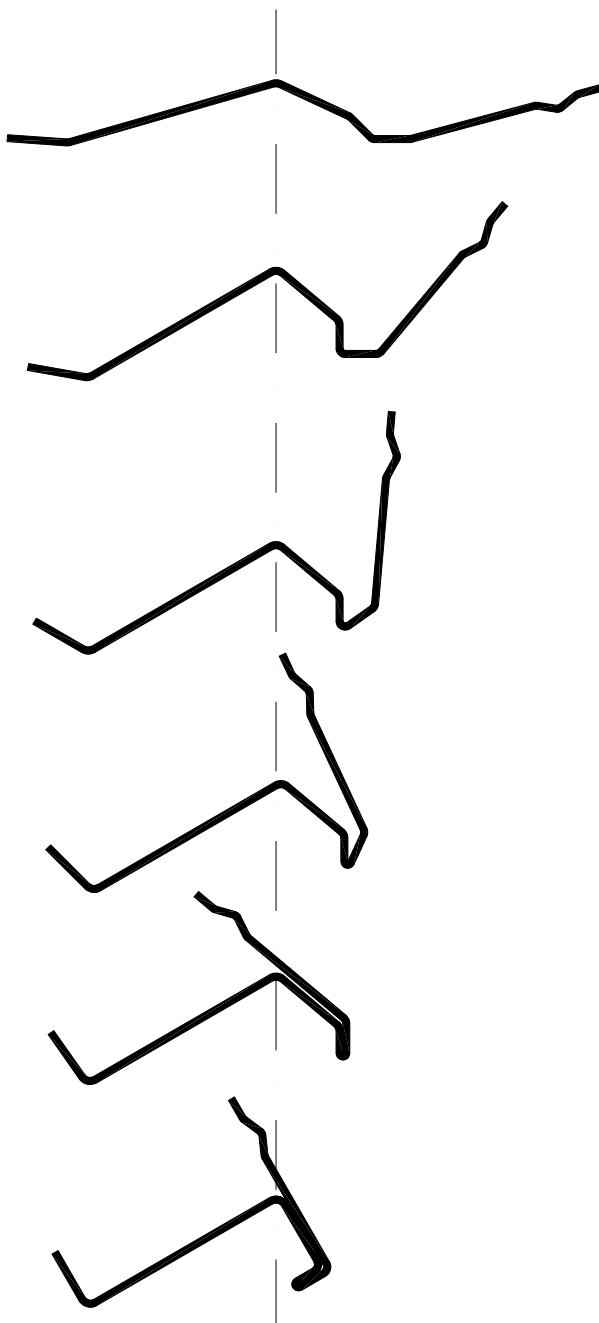


Рис. 4.5. Положение основной оси профиля

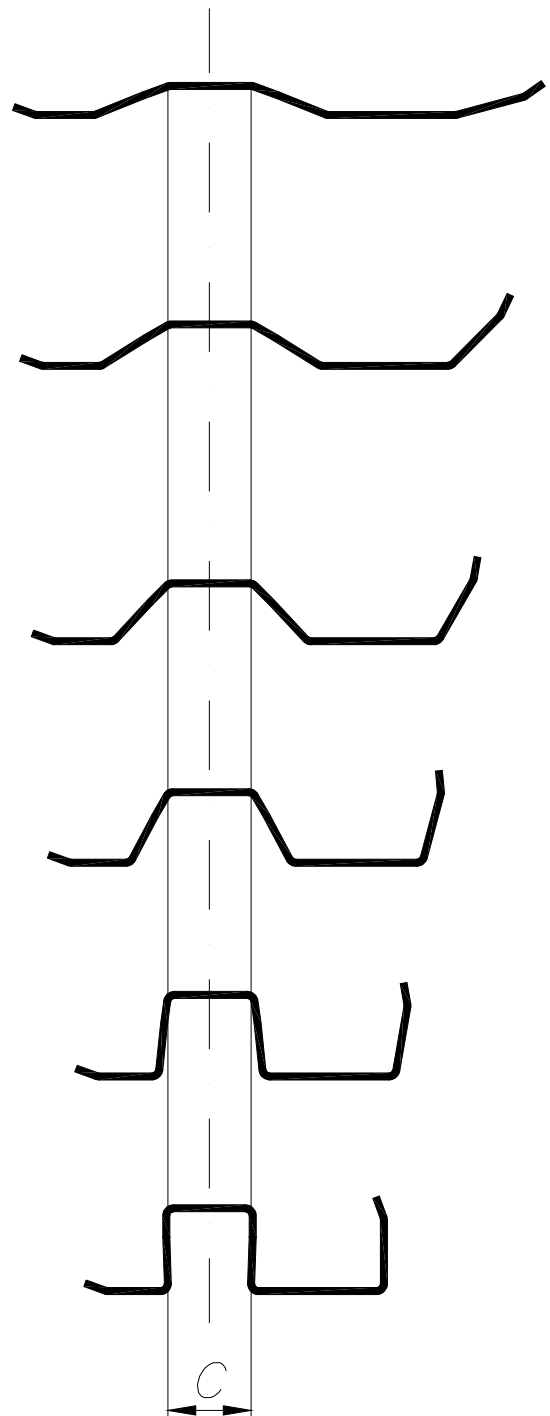


Рис. 4.6. Основной участок профиля

ношению к осям основных валков (рис. 4.4). Специальный профиль, F – типа изготавливался в условиях экспериментального производства.

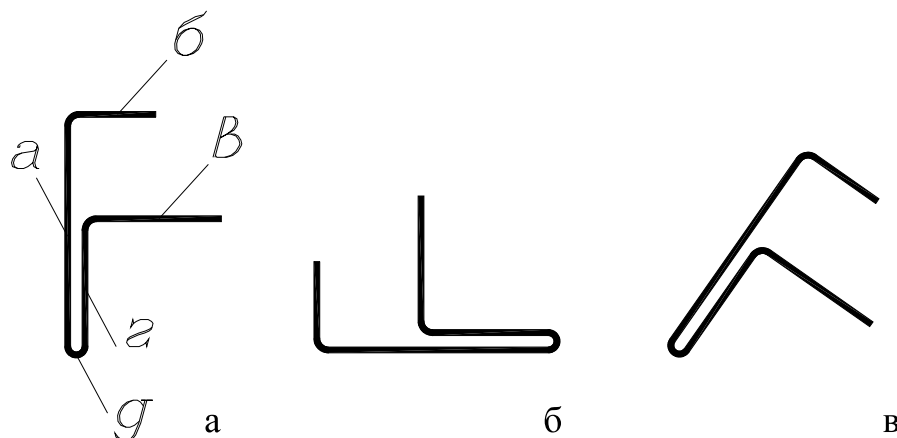


Рис. 4.4. Расположение профиля по отношению к осям основных валков

Профиль изготавливается из стальной оцинкованной ленты с полимерным покрытием для нужд строительной индустрии. Основные требования, предъявляемые к профилю: сохранение целостности покрытия, обеспечение прямолинейности изделия, отсутствие скручивания и кромковой волнистости.

При расположении профиля по отношению к осям основных валков как указано на рис. 4.4а будет происходить нарушение покрытия по поверхностям **а**, **г**, кроме того полка **б** будет подвержена кромковой волнистости, при этом будут иметь место значительные поводки профиля в продольном направлении, скручивание профиля вокруг продольной оси.

Что касается способа расположения профиля по отношению к осям основных валков как указано на рис. 4.4б, то этот вариант тоже не является рациональным поскольку нарушение покрытия будет наблюдаться в зоне сгиба **д**, кромковая волнистость образуется на полке **в**, при этом поводки профиля будут незначительны и устранимы в правильном устройстве.

Последний вариант расположения профиля по отношению к осям основных валков, предложенный на рис. 4.4в, является предпочтительным с точки зрения обеспечения качества: покрытие не нарушается, кромковая волнистость отсутствует, поводки минимальны.

4.5. Выбор основной оси профилирования

Качество изготавливаемого профиля во многом зависит от правильного выбора основной оси профиля (оси профилирования).

Основной осью профиля (рис. 4.5) называется прямая линия, проходящая вдоль заготовки через такую точку сечения профиля, которая на всех технологических переходах не изменяет своего начального положения. Как правило, основная ось профиля параллельна установочной базе профилегибочного стана.

Физически основная ось профиля принадлежит бесконечно узкой в поперечном направлении прямой полоске материала с высотой, равной толщине заготовки, проходящей вдоль всей длины заготовки.

Участок профиля С, расположенный параллельно осям валов, через который проходит основная ось, называется основным участком профиля (рис. 4.6).

При выборе основной оси профиля руководствуются следующим:

- основная ось профиля должна быть прямой;
- ось профилирования по возможности должна делить ширину заготовки пополам;
- жесткость подгибаемых элементов по обе стороны основной оси должны быть по возможности одинаковыми;
- для симметричных профилей ось профиля должна проходить через ось симметрии профиля;
- желательно, чтобы основная ось профиля проходила через участок профиля, параллельный осям основных валов (см. участок С, рис. 4.6).

Определение основного участка профиля более предпочтительно, чем выбор только основной оси профиля. Это обусловлено тем, что основной участок профиля как бы удерживает заготовку от боковых и вертикальных смещений, и влияет на предупреждение скручивания в продольном направлении, в то время как выбор основной оси профиля определяет преимущественно смещение заготовки в вертикальной плоскости.

4.6. Разработка технологических схем формообразования

При проектировании инструмента особое внимание следует уделять при выборе системы калибровки, схемы расчетов калибра, принципа формовки заготовки.

Как указано в работах [58, 62, 174, 175] 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 (рис. 4.7).

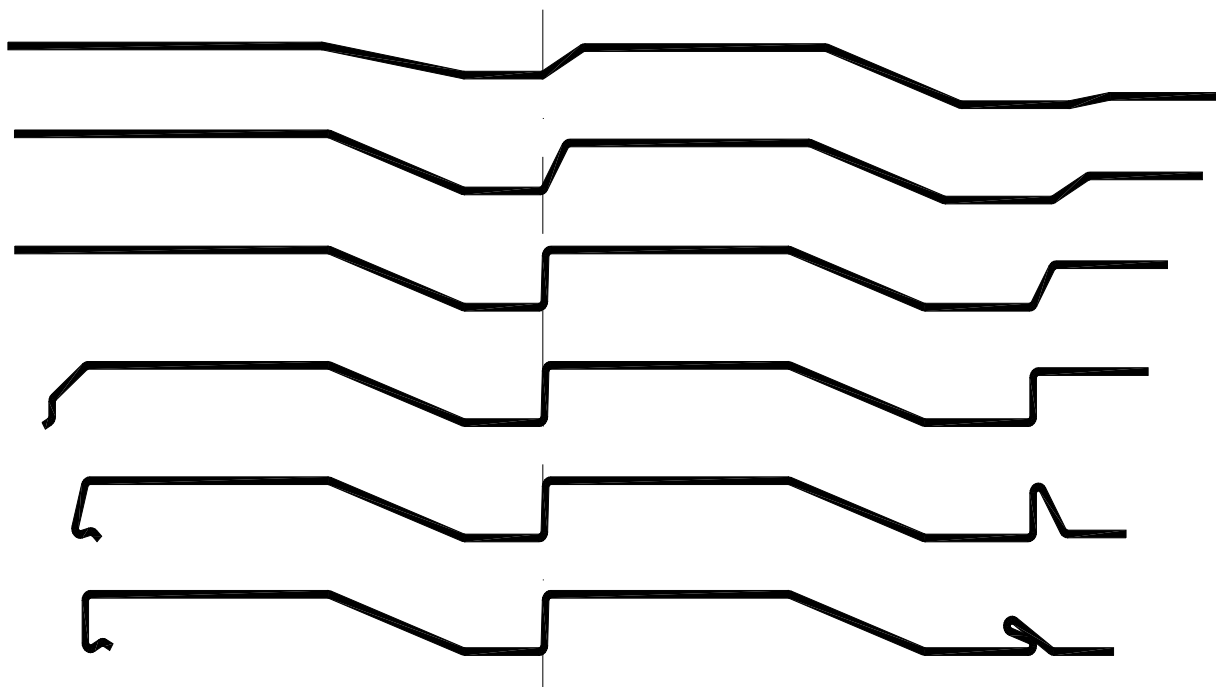


Рис. 4.7. Параллельная система калибровки роликов

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 уголковой зоне. На настоящий момент известно три способа формовки [72, 23, 174]:

- 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:

- Способ 1 и 2 не учитывают особенности течения металла в уголковой зоне.
- Способ 1 и 2 неприемлемы для изготовления сложных профилей.

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

В связи с вышесказанным, при реализации метода интенсивного деформирования 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 угловой зоне. Исключение составляют элементы отгибаемые на угол $\alpha > 90^\circ$.

Данный способ применим для профилей любой степени сложности, и хорошо зарекомендовал себя на протяжении ряда лет в производственных условиях.

4.7. Определение углов подгибки элементов профиля

Определение углов подгибки элементов профиля по переходам в значительной степени влияет на качество гнутого профиля, потребное количество формирующих клетей, себестоимость готовой продукции.

Несовершенство схем формообразования и неверный выбор углов подгибки при производстве гнутых профилей в условия ограниченного числа технологических переходов приводит к кромковой волнистости подгибаемых полок, прогибу профиля в вертикальной плоскости и его скручиванию вокруг продольной оси.

Угол подгибки элемента профиля за один технологический переход представляет собой арифметическую разницу между суммарным углом подгибки на актуальном и предшествующем переходах (рис. 4.8):

$$\alpha_i^{\text{текущ}} = \alpha_i - \alpha_{i-1}$$

где α_i – угол подгибки на актуальном переходе, град;

α_{i-1} – угол подгибки на предшествующем переходе, град.

На выбор углов подгибки преимущественным образом влияют следующие основные факторы:

- величина растягивающих напряжений на кромках подгибаемых элементов профиля;
- номер технологического перехода и инструмент, при помощи которого осуществляется подгибка;
- тип профилегибочного станка (межклетьевое расстояние, мощность, скорость профилирования).

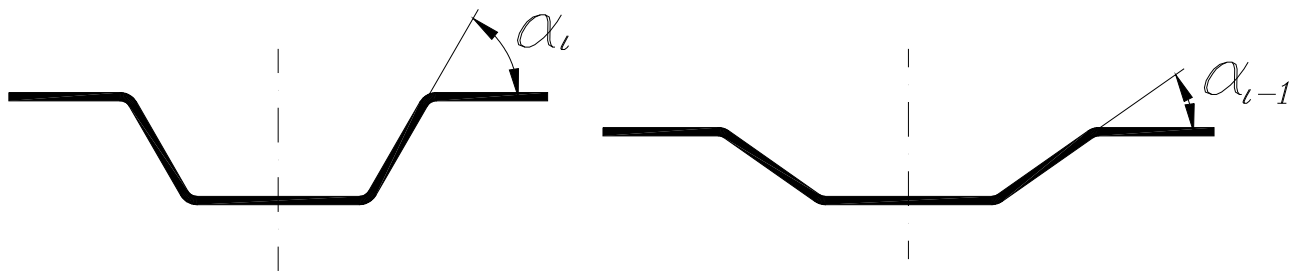


Рис. 4.8. Угол подгибки за один технологический переход

На первом этапе определения угла подгибки целесообразно установить предельно допустимый угол, на который можно подогнуть элемент без образования кромковой волнистости.

Аналитически критический угол подгибки можно определить по зависимостям, полученным в разделе 2 по формулам (2.52 и 2.53). Критический угол также можно определить, основываясь на полученных экспериментальных данных в разделе 3 (рис. 3.12). Назначаемый технологом угол подгибки элемента профиля не должен превышать его предельное значение.

Номер технологического перехода и инструмент, при помощи которого осуществляется подгибка, также существенным образом влияет на выбор угла подгибки. На рис. 4.9. представлена схема действия сил при подгибке элемента профиля различным инструментом [176].

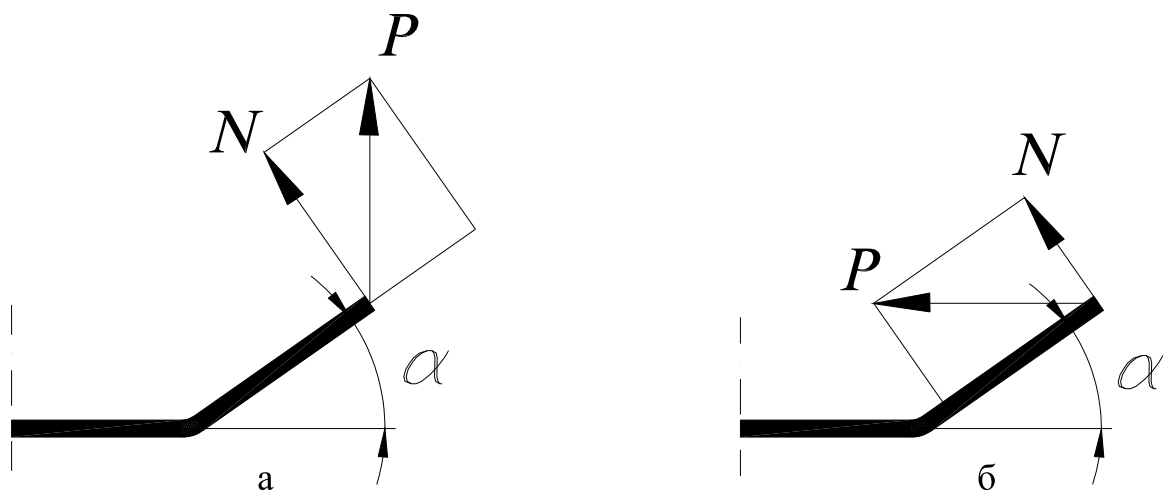


Рис. 4.9. Схема действия сил при подгибке различным инструментом: а – основными формующими валками; б – вспомогательным инструментом; P – сила давления валков, приложена перпендикулярно оси их вращения; N – составляющая силы P , производящая подгибку, α – угол подгибки элемента профиля

Для случая подгибки основными валками имеем

$$N = P \cos \alpha,$$

а для подгибки вспомогательным инструментом

$$N = P \sin \alpha .$$

Очевидно, что при подгибке профиля основными валками наиболее благоприятные условия гибки будут при меньших значениях угла α с горизонтальной осью профиля ($0 < \alpha < 45$ град.), в то время как в случае подгибки боковым вспомогательным инструментом наиболее благоприятные условия будут при больших значениях угла α ($45 < \alpha < 90$ град.). В связи с этим рекомендуется на предварительных переходах углы подгибки основным формующим инструментом назначать несколько больше, чем на переходах окончательного формообразования. Применение вспомогательного инструмента с целью задания дополнительных деформаций на предварительных переходах неэффективно, рекомендуется использовать вспомогательные ролики и направляющие линейки только для направления заготовки в предварительных переходах.

Тип станка, в частности, его межклетьеовое расстояние также влияет на выбор угла подгибки. При назначении угла подгибки (табл. 4.1) желательно соблюдать следующие соотношения между зоной плавного перехода и межклетьевым расстоянием станка [148, 177]:

$$0.2L_M \leq L \leq L_M$$

где L_M – межклетьеовое расстояние станка, мм; L – зона плавного перехода, мм. Выбранные углы подгибки следует проверять по ограничению (2.21).

Таблица 4.1

Рекомендуемые углы подгибки за один переход, град

Тип инструмента	Толщина материала, мм		
	0,5 ÷ 1,0	1,0 ÷ 1,5	1,8 ÷ 2,5
Основные валки	20 ÷ 35	25 ÷ 45	15 ÷ 30
Вспомогательные ролики	10 ÷ 20	10 ÷ 15	5 ÷ 10
Направляющие планки	5 ÷ 15	5 ÷ 10	до 5

Необходимо также учитывать тот факт, что равномерное распределение углов подгибки по переходам формообразования не обеспечивает равномерного распределения продольных деформаций, возникающих в подгибаемом элементе. Методика и необходимые расчетные зависимости для определения таких углов подгибки, обеспечивающих равномерное распределение продольных деформаций по переходам представлены в разделе 2.4.

4.8. Обеспечение размерной точности гнутых профилей

Обеспечение точности размерных характеристик поперечного сечения профиля приобретает особую актуальность в связи с освоением новых типовых размеров профилей для сборных конструкций в строительстве, автомобилестроении и в сфере услуг по отделке интерьера промышленных и гражданских сооружений.

В процессе эксплуатации из-за износа роликовой оснастки размеры поперечного сечения профиля изменяются и выходят за пределы поля допуска, определенного чертежом. Обычно процедура проектирования роликового инструмента предусматривает выполнение калибра по номинальным размерам чертежа профиля. Однако, вследствие упругой отдачи реальный линейный размер элемента профиля L увеличивается на величину ΔL . Величину изменения размера определим на основе теоремы Ильюшина о разгрузке с учетом особенностей интенсивного деформирования [178, 179, 180]:

$$\Delta L = \frac{3 \cdot k \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r + 1/2)^2}{1 + 6 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r + 1/2)} \cdot s, \quad (4.5)$$

где k – коэффициент;

σ_T , E – предел текучести и модуль Юнга материала соответственно, МПа;

r , s – внутренний радиус зоны сгиба и толщина заготовки соответственно, мм.

При проектировании роликовой оснастки надлежит принимать во внимание изменение линейных размеров профиля по отношению к калибру роликов, используя формулу (4.5). Так, следует назначать размеры калибра по нижнему пределу поля допуска или уменьшать номинальный размер профиля на сумму минусового допуска и величину ΔL , рассчитанную по формуле (4.5). Данный подход к проектированию инструмента позволит выдерживать допуски на линейные размеры поперечного профиля при значительном износе роликов и, следовательно, позволит существенно увеличить срок службы технологического оснащения. Рис. 4.10. иллюстрирует этот подход к проектированию роликовой оснастки.

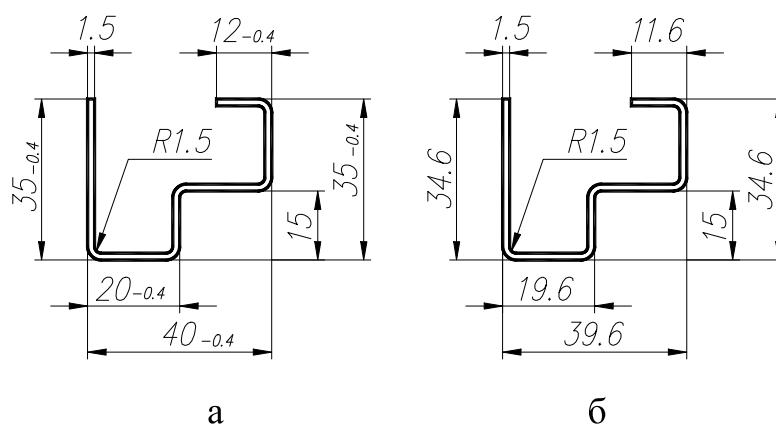


Рис. 4.10. Процедура проектирования инструмента:
а – чертеж профиля; б – чертеж роликового калибра

4.9. Скоростной режим профилирования

Скоростной режим профилирования оказывает существенное влияние на возможность получения профиля данного типоразмера, качество поверхности готовых профилей, износ рабочих валков, энергозатраты и т. д.

При расположении профиля в валках целесообразно стремиться к тому, чтобы высота заготовки в каждом из технологических переходов была минимальна. На практике это достигается за счет рационального расположения профиля в основных валках (рис. 4.11.). С увеличением высоты изготавливаемого профиля увеличивается его относительное скольжение в валках, возникают энергетические потери на трение, появляются царапины, задиры и риски на поверхности готового профиля. При разработке схем формообразования и проектировании инструмента для создания правильного скоростного режима следует учитывать влияние высоты подгибаемого элемента и направление его подгибки.

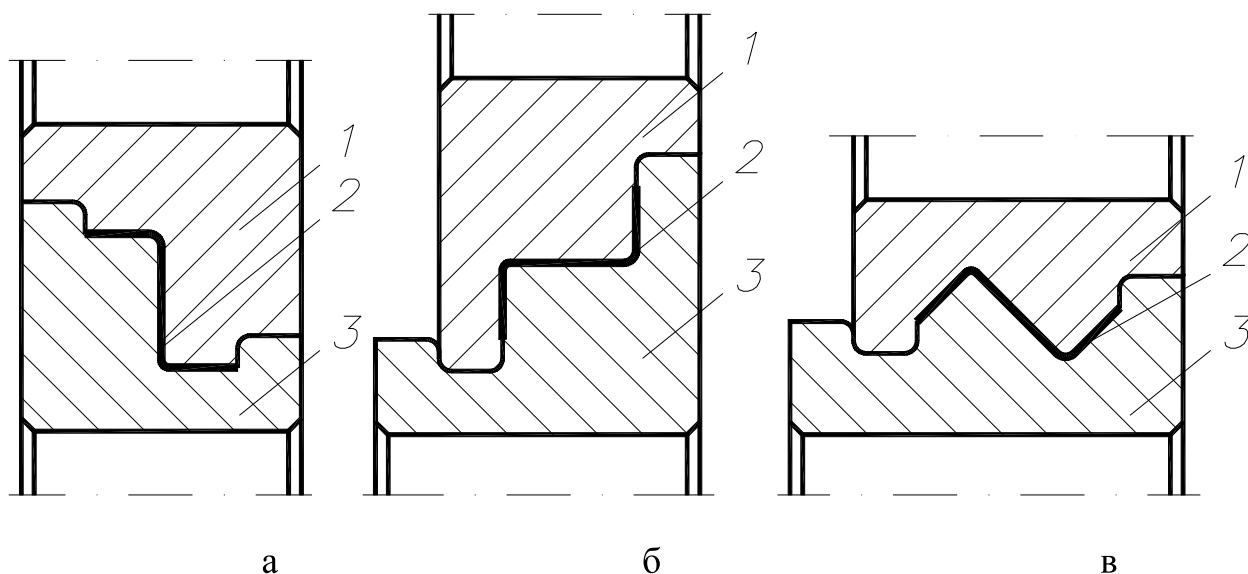


Рис. 4.11. Расположение профиля в валках для создания оптимального скоростного режима: а и б – нерациональное расположение; в – рациональное расположение; 1 – верхний валок, 2 – заготовка, 3 – нижний валок

Скорость движения профилируемой полосы определяется суммарным воздействием на нее верхнего и нижнего валков. Для создания оптимального скоростного режима, гарантирующего минимальные потери на трение, т. е. минимальное проскальзывание валков по поверхности заготовки на наиболее нагруженных участках, следует так расположить профиль, чтобы места изгиба формировались участками инструмента, лежащими на окружностях их основных диаметров. Основными диаметрами называют диаметры верхнего и нижнего валков, у которых точки, лежащие на окружностях, имеют одинаковые линейные скорости.

При неправильно выбранном скоростном режиме достаточно часто может наблюдаться явление набегания заготовки. Явление набегания заготовки выражается в том, что если средняя скорость актуальной пары валков будет меньше, чем у предыдущей пары, то заготовка не будет успевать проходить че-

рез последующую пару, при этом будет происходить накапливание материала заготовки перед актуальной парой в виде зажимов, складок и процесс профилирования будет нарушен

Для увеличения окружных скоростей на каждом последующем технологическом переходе следует производить последовательное увеличение основных диаметров нижних валков на $0,5 \div 1\%$ для материалов толщиной от 0,5 до 1 мм и на 0,5% для материалов толщиной от 1 до 2 мм. Данный прием позволяет не только отчасти предотвратить набегание материала, но и обеспечить необходимое тяговое усилие при использовании неприводных межклетьевых проводок.

Кроме создания правильного скоростного режима и достаточного тягового усилия, для устранения явления набегания заготовки большое значение приобретает ее жесткость в процессе профилирования, т. е. сопротивление полосы продольному изгибу. Для избежания продольного изгиба полосы в процессе профилирования переходные формы целесообразно выбирать таким образом, чтобы сечение заготовки на первых же переходах имело достаточный момент инерции.

Учет влияния скоростного режима особенно важен при разработке технологии формообразования профилей закрытого и полужакрытого типов в связи с односторонним взаимодействием инструмента и заготовки на последних переходах.

4.10. Условия замыкания калибров при интенсивном деформировании

Производство гнутых профилей методом интенсивного деформирования в роликах [19] связано с определенной спецификой этого процесса в сравнении с традиционным профилированием: 1) более значительная степень «стеснения» заготовки в калибрах; 2) наличие закрытых калибров на всех переходах; 3) весьма неравномерная по переходам подгибка элементов профиля [153]; 4) специфическая схема формовки зон сгиба по переходам; 5) меньшее межклетьевое расстояние и меньшие диаметры формующих роликов и ряд других.

Указанные особенности процесса требуют основательного рассмотрения процесса формообразования с точки зрения обеспечения надлежащего качества изготавливаемого профиля и минимизации сопутствующих производственных издержек. Так, изготовление профилей из материалов с покрытием часто сопровождается нарушением последнего на периферийных участках в местах замыкания роликовых калибров при калькировании технологических решений с традиционного профилирования. Нарушение целостности покрытия происходит вследствие неблагоприятных условий при заходе профиля в калибр (ранний контакт буртов роликов с заготовкой в предосевой плоскости роликовой пары, сопровождаемых изгибом заготовки и высокими контактными напряжениями, закусывание кромки и др.), связанных со схемами замыкания калибров. При отработке технологии приходится дорабатывать технологическое оснащение или

даже заменять его, что приводит к повышению уровня прямых материальных затрат, трудоемкости отработки технологии и увеличению сроков ее освоения. Указанные проблемы можно отчасти решить путем надлежащего выбора схемы замыкания роликовых калибров.

Для анализа условий замыкания калибров при горизонтальном расположении роликов нами разработан классификатор (рис. 4.12), основанный на следующих параметрах классификации: 1) тип замыкания; 2) тело врезания калибра; 3) вид замыкания (по расположению линии разъема калибра); 4) вид бокового взаимного базирования; 5) вид базирования смыкания калибров. Основываясь на более чем двадцатилетней практике разработки технологии интенсивного формообразования гнутых профилей, можно также сформулировать требования к роликовой оснастке, относящиеся преимущественно к условиям замыкания роликовых калибров, однако не исчерпывающих всех требований к формирующей роликовой оснастке:

- 1) технологическая пригодность (функциональность);
- 2) взаимное базирование роликов по вертикальным поверхностям;
- 3) минимальное число поверхностей базирования;
- 4) обеспечение равномерного смыкания;
- 5) двустороннее базирование по образующим цилиндра;
- 6) согласование галтелей и скруглений;
- 7) предупреждение аварийных ситуаций (закусывание заготовки, выкрашивание ролика, схватывание и т. д.);
- 8) единообразие замыкания калибров и торцевого базирования роликов во всех переходах;
- 9) минимальный расход металла на изготовление оснастки;
- 10) минимальная трудоемкость обработки заготовки ролика.

Проведем анализ разработанного классификатора с точки зрения сформулированных выше требований. Прямое замыкание роликов предусматривает непосредственный контакт нижнего и верхнего роликов, в то время как замыкание через промежуточный элемент (рис. 4.12, блок 2) предполагает наличие неподвижной оправки или подвижного элемента, например, тела вращения (рис. 4.12, блок 2.1.1; рис. 4.13). Замыкающий элемент в виде тела вращения с полиуретановым бандажом является эффективным средством предотвращения нарушения покрытия заготовки в месте сгиба или вблизи кромки заготовки. Однако замыкание калибра по месту расположения кромки заготовки связано с ухудшением ее захода в калибр, поскольку в предосевой плоскости кромка приходит в контакт с нижней плоскостью замыкающего ролика – возможно ее закусывание. Поэтому основное назначение данного вида замыкания – удержание угловой зоны при изготовлении открытых профилей с подгибкой периферийных элементов во внутрь. В случаях формообразования профилей из материала с покрытием при слабой адгезии последнего и подложки, этот вид за-

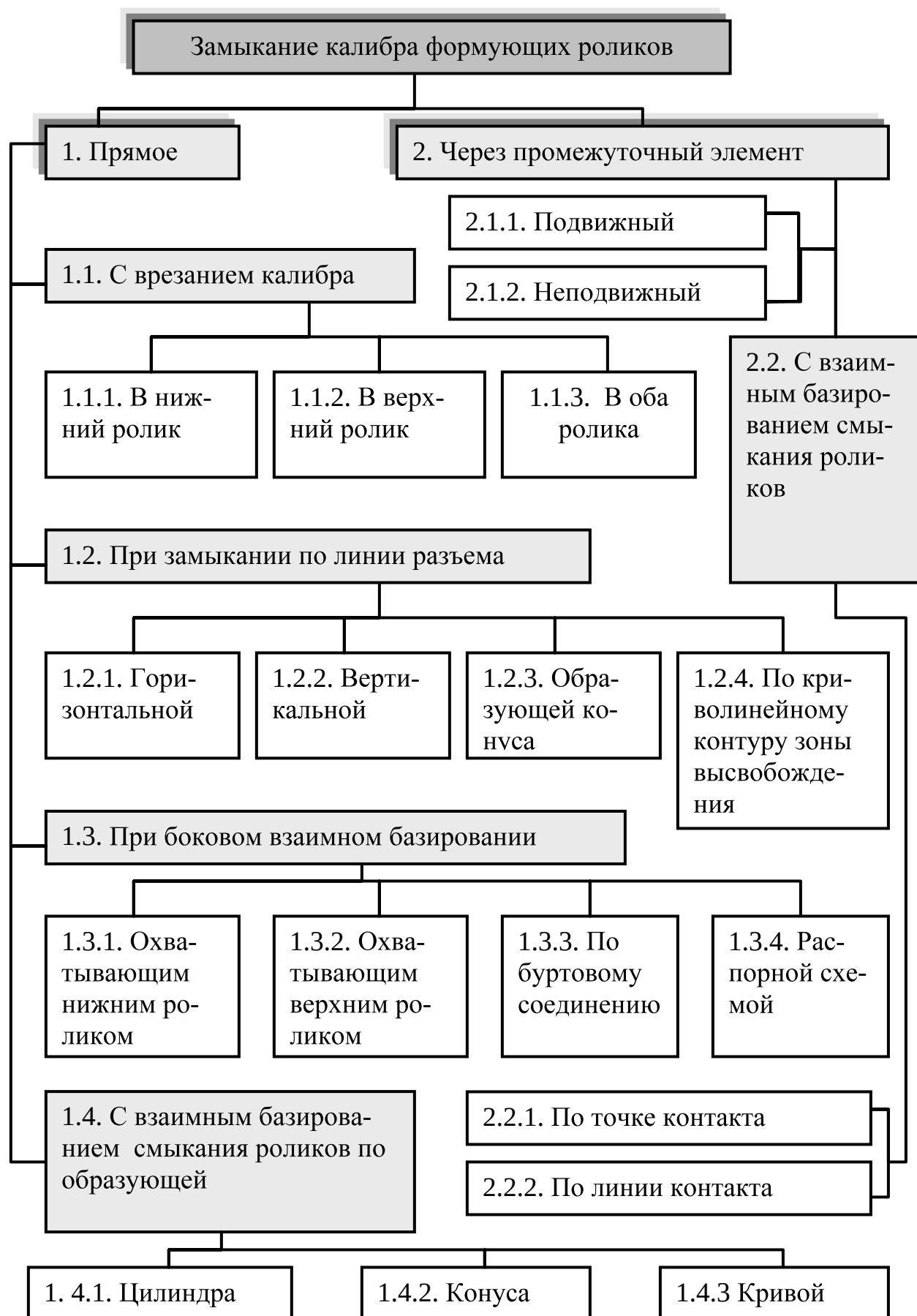


Рис.4.12. Классификатор замыканий роликового калибра

мыкания часто бывает единственно возможным для обеспечения надлежащего качества профиля. Базирование смыкания на рис. 4.13 осуществляется по прямой линии (соприкосновение цилиндра и плоской торцевой поверхности замыкающего ролика) (см. рис. 4.12, блок 2.2.2), хотя возможно и базирование смыкания посредством точечного контакта (см. рис. 4.12, блок 2.2.1) путем выполнения скругленного бурта на торцевой поверхности замыкающего ролика 8 (см. рис. 4.13).

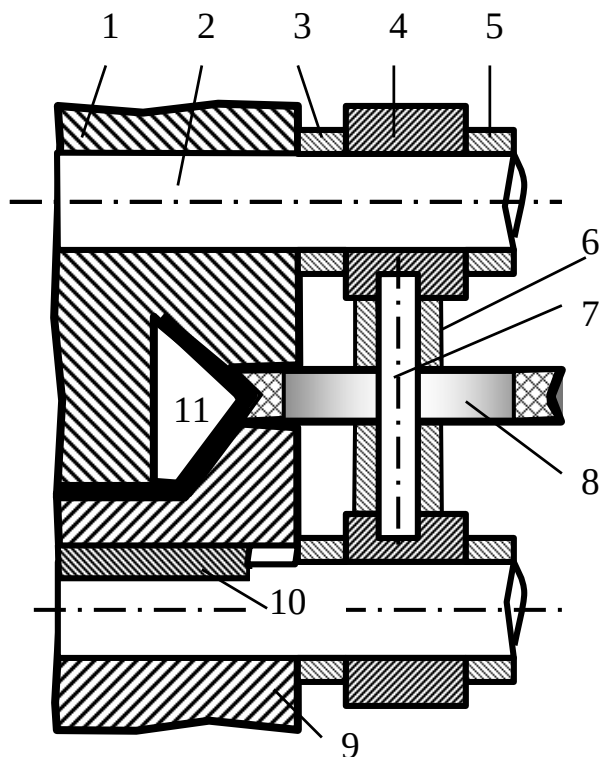


Рис. 4.13. Замыкание роликов через промежуточный элемент:

1 – верхний ролик; 2 – вал; 3, 5, 6 – дистанционные втулки; 4 – поводковая опора; 7 – ось; 8 – замыкающий ролик; 9 – нижний вал; 10 – шпонка; 11 – заготовка

Замыкание калибра неподвижной оправкой можно осуществлять в случае необходимости воздействия на заготовку в межклетьевом пространстве (например, для предотвращения кромковой волнистости полки профиля [181]) с вводом ее непосредственно в калибр.

Рассмотренные виды замыкания калибра через промежуточный элемент полностью удовлетворяют требованиям 1, 3, 4, 7 к роликовой оснастке, однако другие требования не выполняются, за исключением, может быть, требования 8, согласно которому боковое базирование осуществляется единообразно дистанционными втулками. Следует иметь в виду, что данный вид замыкания калибра является специфическим и некоторые из требований, изложенных выше, для него не вполне приложимы. Разумеется, введение дополнительных элементов технологического оснащения повышает стоимость технологии и, как следствие, цену конечного продукта.

При прямом замыкании калибра возможны несколько видов врезания его в формующий инструмент (см. рис. 4.12, блоки 1.1.1 – 1.1.3). Врезание калибра в нижний ролик (рис. 4.14а) хотя и приемлемо для производства профилей из материалов без покрытия, но не является оптимальным при производстве профилей из материала с покрытием: перед входом в калибр на заготовку вблизи кромки действует сосредоточенная сила (ввиду точечного контакта) со стороны скругленной ступеньки нижнего ролика и создает значительные контактные напряжения. В этой связи, такое замыкание не удовлетворяет критерию функциональности 1, в то время как другие требования могут выполняться.

Врезание калибра в верхний ролик (рис. 4.14б) лишено указанного недостатка и широко применяется при интенсивном формообразовании. Врезание калибра в оба ролика (рис. 4.14в) несет в себе недостатки врезания в нижний ролик, а кроме того, требование 7 диктует скругление кромок ступенек на обоих роликах во избежание выкрашивания, что приводит к проблеме закусывания заготовок с толщиной менее 0,8 мм. Для заготовок толщиной более 2 мм из сталей без покрытия этот вид врезания является приемлемым. Трудоемкость изготовления роликовой пары с врезанием калибра в оба ролика несколько увеличивается по сравнению с другими его видами. Другие же технологические требования могут быть удовлетворены.

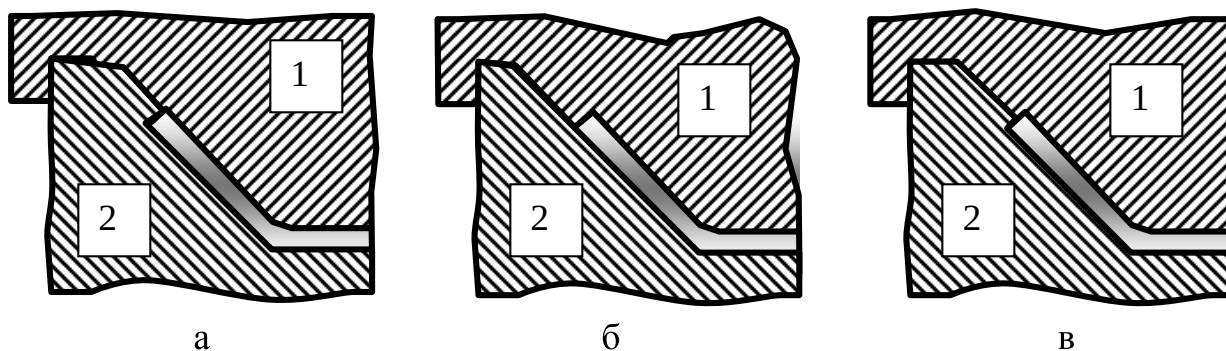


Рис. 4.14. Виды врезания калибра: а – в нижний ролик 2; б – в верхний ролик 1; в – в оба ролика

Замыкание калибра по отношению к виду линии его разъема представляется вариантами, отраженными в блоках 1.2.1 – 1.2.4 (рис. 4.12). При горизонтальном расположении линии разъема (рис. 4.15а) в верхнем ролике (при врезании в него калибра) необходимо предусматривать кольцевые участки с обра-

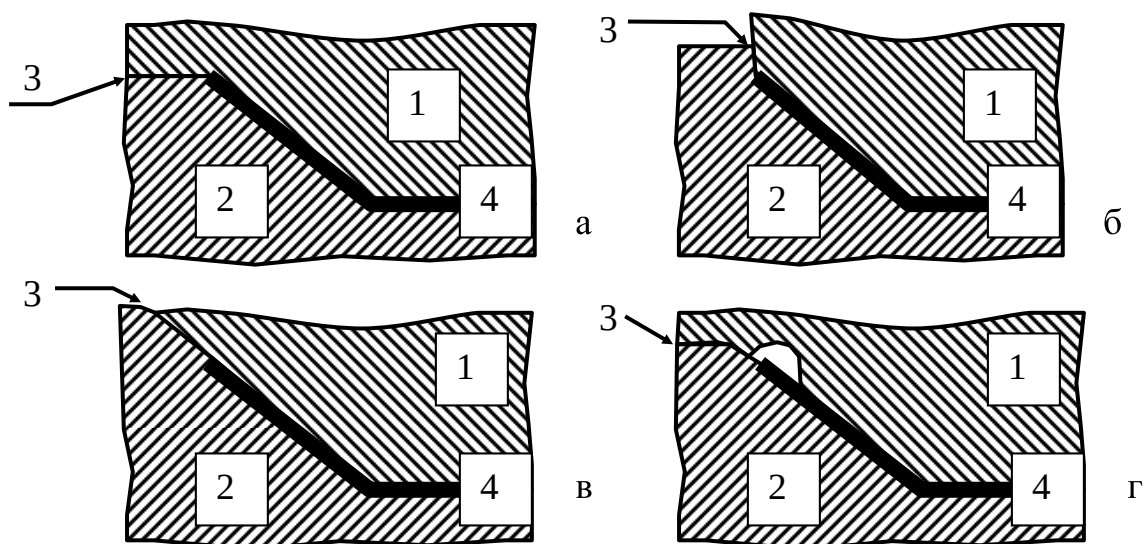


Рис. 4.15 Замыкание калибра по виду линии разъема: а - горизонтальная; б – вертикальная; в – образующая конуса; г - кривая; 1 – верхний ролик; 2 – нижний ролик; 3 – линия разъема; 4 - заготовка

зующей, параллельной поверхности торца заготовки, что создает концентраторы напряжений и может приводить к выкрашиванию материала ролика. Аналогичная проблема возникает и при врезании калибра в нижний ролик. При изготовлении профилей с толщиной более 2 мм и приложении значительных торцевых сил может происходить пластический «скос» кромки, приводящий к появлению заусенца. Вертикальное расположение линии разъема калибра (рис. 4.15б) предпочтительнее применять на первых переходах в связи с меньшим приращением «стеснения» в расчете на один градус угла подгибки и близким к вертикальной плоскости положением поверхности торца заготовки. Кроме того, на первых переходах практически не применяют торцевое поджатие, что также является благоприятным фактором для процесса формоизменения.

На последних переходах замыкание калибра по вертикальной линии разъема приводит к нежелательному пластическому изгибу периферийного элемента в области, примыкающей к торцу, в связи большой степенью «стеснения» заготовки, а для осуществления торцевого поджатия приходится предусматривать так называемый «зубчатый упор» в виде конического ободка, подверженный выкрашиванию при толщине заготовки более 2 мм. Кроме того, контакт вертикального участка ролика и заготовки при локальном изгибе последней приводит к значительным контактным напряжениям и повреждению покрытия. При изготовлении тонкостенных профилей (до 1 мм толщиной) указанные проблемы несколько сглаживаются.

Замыкание калибра по образующей конуса (рис. 4.15в) с точки зрения функциональности является предпочтительным, поскольку в данном случае устраняются недостатки схемы рис. 4.15б: отсутствует изгиб заготовки вблизи торцевой зоны, контактные напряжения уменьшаются.

Замыкание калибра по кривой линии (рис. 4.15г) в некоторых случаях может быть оптимальным с точки зрения функциональности, однако сложность выполнения криволинейного контура с жесткими допусками создает проблемы в изготовлении технологической оснастки и на практике применяется исключительно редко.

Из рассмотренных схем только базирование по вертикальным поверхностям при их минимальном числе и минимальном расходе материала с минимальной трудоемкостью обработки заготовки ролика (требования 2, 3, 9 и 10) является оптимальной. Указанные требования являются конкурирующими по отношению к требованию функциональности. Разумным компромиссом в этом случае может быть схема замыкания калибра с линией разъема, выполненной в виде образующей конуса с последующим взаимным базированием по вертикальным поверхностям (блок 1.3, рис. 4.12), отстоящим от торцов заготовки на величину, равную перемещению «стеснения» в текущем переходе. Другие требования к условиям замыкания могут быть выполнены.

В традиционном профилировании осевое базирование роликов клетки можно осуществлять с помощью дистанционных втулок, в то время как при

интенсивном деформировании необходимо применять боковое взаимное базирование роликов (см. рис. 4.12, блок 1.4) для обеспечения достаточной точности расположения оси профилирования при общем базировании одного из роликов пары по торцевой опорной поверхности бурта вала. С точки зрения удовлетворения условиям 2, 3, 8, 9, 10 замыкания калибра идеальными видами базирования можно было бы считать схемы «б» и «г» рис. 4.16, однако они не всегда являются благоприятными для реализации технологии, в частности, схема «г» создает встречное движение торца бурта верхнего ролика и торца заготовки, что, вследствие их контакта, приводит к «развалу» заготовки, ее изгибу в межклетьевом пространстве. Схема «а» при надлежащем выборе длины конической образующей [181] является наиболее приемлемой с учетом всех конкурирующих требований. Отметим, что угол наклона образующей конуса, выходящей за пределы габаритов калибра, может быть отличным от суммарного угла подгибки полки в текущем переходе [181]. В этом случае при изготовлении профилей с толщиной стенки более 2 мм облегчается центрирование заготовки в роликах. Схемы «д» и «е» на рис. 4.16 хотя и возможны, однако они не удовлетворяют требованиям 3, 9, 10. Понятно, что наличие пяти поверхностей базирования (две из них вертикальных) только с одной стороны ролика создает значительные проблемы в обеспечении сопряжения поверхностей с учетом погрешностей их обработки.

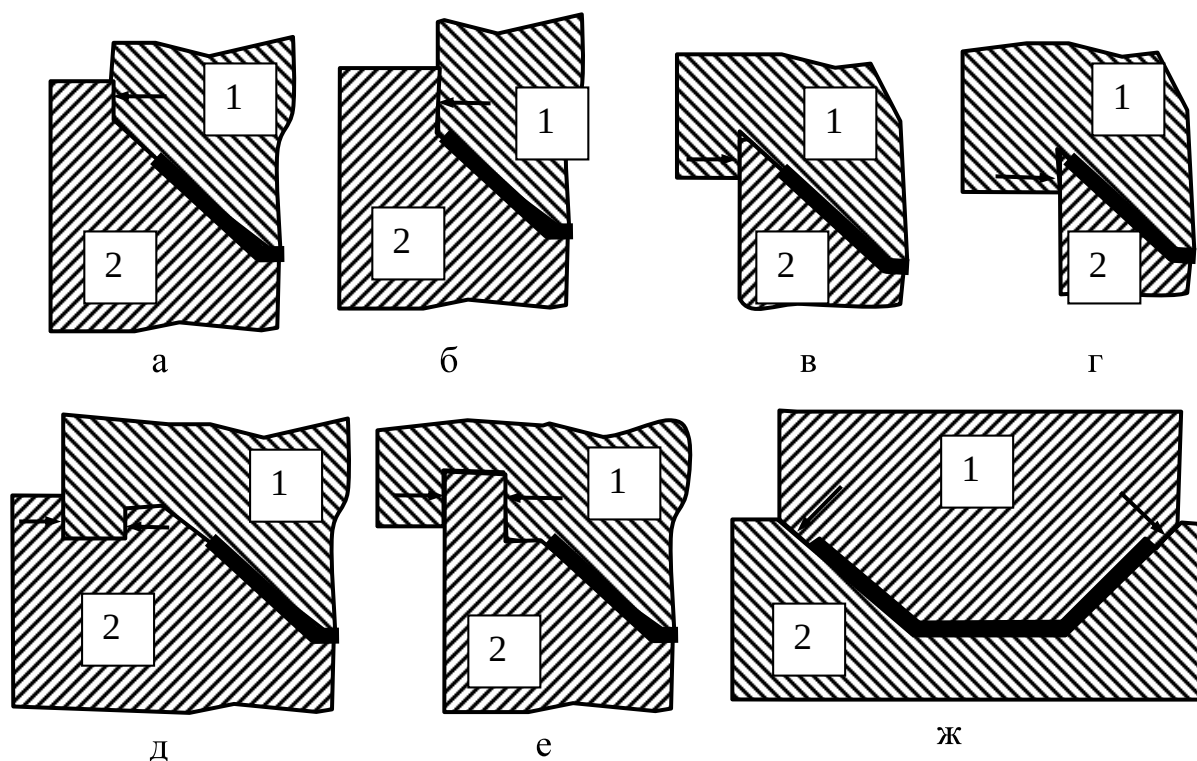


Рис. 4.16. Боковое взаимное базирование: а, б – охватывающим нижним роликом 2; в, г – охватывающим верхним роликом 1; д – буртом верхнего ролика; е – буртом нижнего ролика; ж – распорной схемой

Распорная схема замыкания (рис. 4.16ж) может быть признана приемлемой для первых и средних переходов, а на последних переходах неизбежно возникает необходимость применения других схем взаимного базирования в связи со значительными горизонтальными перемещениями кромки и затруднением центрирования заготовки. В этом случае остаются невыполненными требования функциональности и единообразия замыкания и базирования по всем переходам.

Взаимное базирование смыкания роликов (обеспечение равномерного зазора по ширине калибра (рис. 4.12, блок 1.4)) может осуществляться по образующим цилиндрических, конических или криволинейных поверхностей. Базирование смыкания роликов оп образующим криволинейных поверхностей связано с проблемами обеспечения точности их сопряжения, а по образующим конических поверхностей без бокового взаимного базирования по вертикальным плоскостям роликов – с высокой чувствительностью схемы замыкания к осевым смещениям роликов. Смыкание цилиндрических поверхностей нижнего и верхнего роликов представляется наиболее целесообразным ввиду легкости их обработки, надежности обеспечения равномерного зазора по ширине профиля, минимального скольжения поверхностей нижнего и верхнего роликов относительно друг друга. На практике силовое замыкание калибра выполняют за счет механизмов разведения и сведения валов (в клетях консольного типа на свободных концах валов обычно располагают замыкающую серьгу, имеющую механизм регулировки).

При проектировании роликов выбор расположения буртов в текущем переходе зависит от режимов подгибки и ширины подгибаемой полки (рис. 4.17),

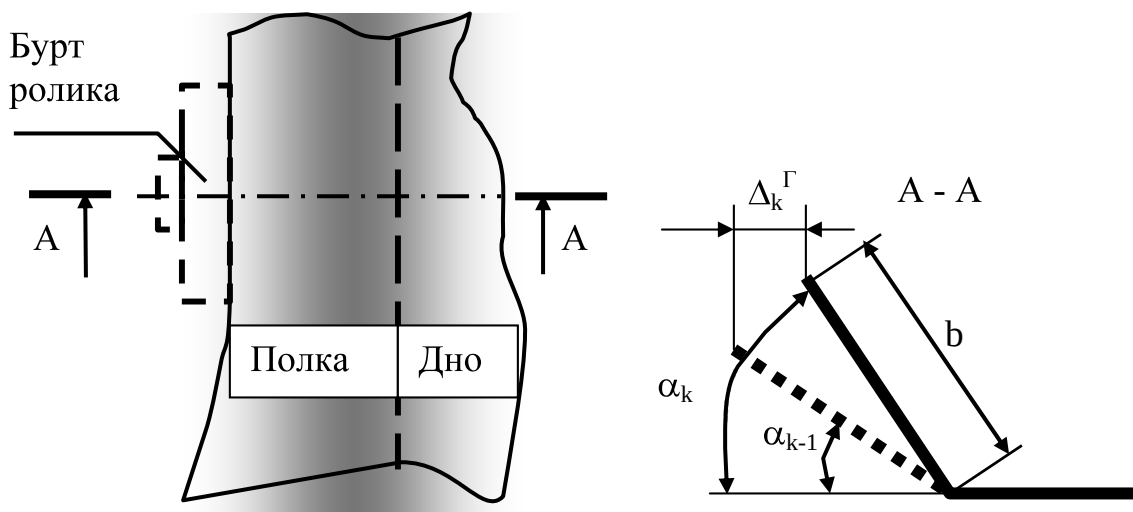


Рис. 4.17. Положение заготовки в калибре

откуда следует, что величина одностороннего «стеснения» полки Δ_k^Γ составляет величину:

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

где b – ширина полки; α_k – суммарный угол подгибки на k -м переходе; $\Delta\alpha_k$ – угол подгибки полки в k -ом переходе.

На рис. 4.18 представлены наиболее целесообразные схемы замыкания калибров, а рекомендуемые значения конструктивных параметров приведены в таблице ниже.

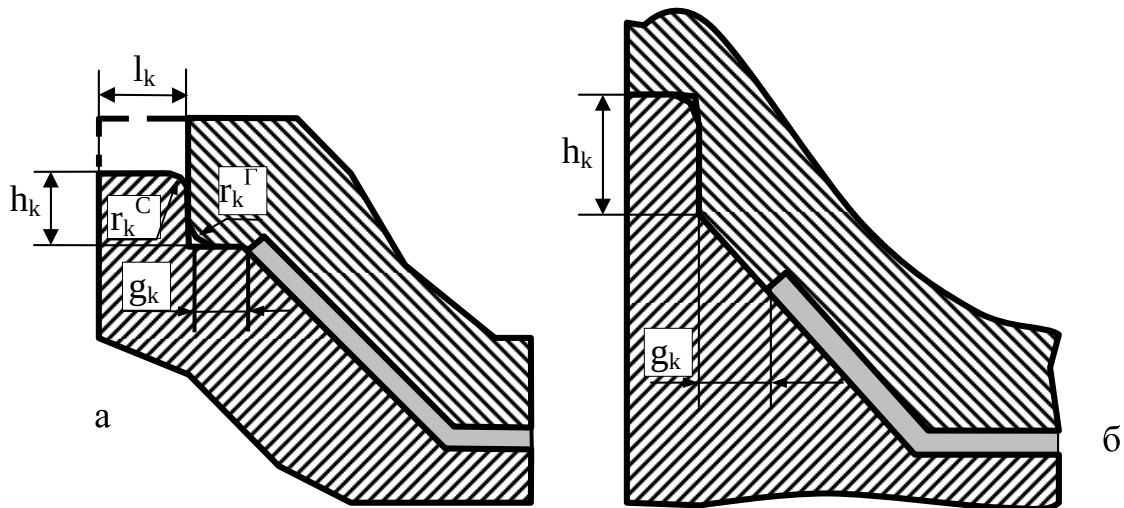


Рис. 4.18. Бурты роликов для выполнения функции бокового взаимного базирования и базирования смыкания: а – линии разреза – образующая цилиндра; б – линия разреза – образующая конуса

Наименование параметра и его обозначение	Соотношения между параметрами, их значения	Примечания
Радиус галтели, r_k^{HG}	$r_k^{HG} = 2 \dots 3 \text{ мм}$	Требование отсутствия концентраторов
Радиус скругления бурта, r_k^{HC}	$r_k^{HG} \leq r_k^{BC}$; $r_k^{HC} = 1 \dots 2 \text{ мм}$	
Высота рабочей торцевой части ролика, выполняющей боковое базирование, h_k^{HB}	$h_k^{HB} = 4 \dots 5 \text{ мм}$	
Высота бурта, h_k^H	$h_k^H = h_k^{HB} + r_k^{HC} + r_k^{HG}$	
Расстояние от точки разреза калибра до бурта, g_k^H	$0 < g_k^H < \Delta_k^Г$	(см. формулу)
Ширина бурта, Δl_k	$\Delta l_k = 10 \dots 15 \text{ мм}$	
Нижний индекс «к» указывает номер перехода; верхний индекс «Н» относится к нижнему ролику, а «В» - к верхнему; «Г» указывает галтель, «С» - скругление; «Б» - боковое взаимное базирование роликов		

Замыкание калибров с полками, обращенными вниз, будет аналогичным рассмотренному, с учетом обращения роликовой пары. При изготовлении профилей с горизонтальным расположением периферийных элементов, на последних переходах следует предусматривать наклон периферийного участка на 4 – 6 градусов относительно горизонтали во избежание кромковой волнистости полки. Величины r_k^{HC} , h_k^H , g_k^H существенно влияют на поведение заготовки в контактной зоне, однако рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данной публикации.

Выполненный анализ возможных схем замыкания роликовых калибров позволяет сформулировать **выводы и общие рекомендации** по выбору замыкания калибров для реализации метода интенсивного деформирования, основанные на вышеизложенных требованиях:

1. Врезание калибра следует по возможности осуществлять в верхний ролик;
2. Линия разъема калибра должна состоять из отрезков образующей конуса/цилиндра и вертикальной линии;
3. Боковое взаимное базирование роликов надлежит осуществлять буртом охватывающего нижнего ролика;
4. Базирование смыкания целесообразно выполнять по образующим цилиндрических поверхностей буртов;
5. Расположение буртов по отношению к точке начала разъема калибра (местоположение кромки заготовки) должно соответствовать условию центрирования и «стеснения» заготовки с учетом конфигурации калибра предшествующего перехода.

4.11. Проектирование технологического оснащения

Проектируемый инструмент должен отвечать не только требованиям функционального назначения и стойкости, но и ряду эргономических требований: удобство установки ролика на стан; удобство настройки горизонтальной оси профилирования; удобство установки зазора в паре роликов и т. п. При проектировании инструмента также следует руководствоваться соображениями экономической целесообразности, в частности, применение метода функционально-стоимостного анализа (ФСА) позволяет существенно сократить затраты на изготовление инструмента.

Технологическое оснащение процесса изготовления листовых профилей по группам основных операций включает:

- оснастку для раскройно-заготовительных операций в составе ножей многодисковых, инструмента для обсежки скосов;
- оснастку для пробивки отверстий (перфорационные штампы летучего типа, перфорационные штампы на базе летучих прессов);
- оснастку для формообразования профилей в составе роликов формующих, втулок распорных, роликов правильных, роликов или фильер промежуточных;

- оснастку для резки профиля в размер (отрубные штампы летучего типа, отрубные штампы на базе летучих прессов).

Комплекты формующих роликов, представляющие основную технологическую оснастку при установке на станок образуют роликовые пары с рабочими калибрами, соответствующими формам технологических переходов. Посадочные места роликов должны соответствовать диаметрам рабочих валов и обеспечивать посадку типа H7/h7.

Острые кромки роликов скругляют радиусами $R = 0.3 \div 0.5$ мм; на посадочных отверстиях роликов выполняются фаски $5 \times 30^\circ$, необходимые для облегчения установки роликов на валы стана, а также для установки роликов в центра токарных станков для их доводки или восстановления. Чистота обработки роликов принимается $\nabla 0.8$, рабочего контура роликов $\nabla 0.4$.

Диаметры формующих роликов на всех переходах следует выбирать конструктивно, исходя из межцентрового расстояния, диаметров рабочих валов и глубины формовки (глубины "вреза"). При этом для достижения достаточной прочности роликов необходимо обеспечить в местах минимальной толщины в радиальном направлении запас материала не менее 10 мм. Для станка ГПС-350М6 при глубине формовки до 50 мм рекомендуется диаметры роликов выбирать в диапазоне от 90 до 200 мм.

Рационально унифицировать форму и размеры конструктивных элементов нерабочего контура в пределах одного комплекта роликов. Постановку размеров рабочего контура роликов следует производить от технологических баз комбинированным методом. В качестве баз при назначении размеров в осевом направлении рекомендуется использовать вертикальные прямолинейные участки, замыкающие рабочий контур.

На этапе проектирования роликов необходимо учитывать условия получения прямолинейного профиля и стабилизации процесса формообразования. Главным из этих условий является обеспечение (за счет рационального проектирования инструмента и настройки станка) прямолинейности оси профилирования и ее параллельности базовым поверхностям станка (рис. 4.19).

Рекомендуется для облегчения и упрощения настройки оси профилирования предусматривать на стадии проектирования следующие условия:

- постоянство межцентровых расстояний по всем переходам, что облегчает настройку оси в вертикальной плоскости, при отступлении от данного условия потребуются дополнительные расчеты, и увеличится трудоемкость процесса настройки;
- постоянство расстояний от основной оси профиля до торцевой установочной плоскости станка, как правило, нижних роликов на всех переходах, что облегчает настройку в горизонтальной плоскости. С целью экономии материала целесообразно назначать разную ширину роликов. В таких случаях необходимо предусмотреть применение компенсирующих распорных втулок, обеспечивающих постоянство суммарной размерной цепи от основной оси профиля до установочной базы станка на всех переходах;

- для обеспечения точности размеров по сечению профиля и стабилизации процесса следует в роликовом калибре выдерживать равномерность и постоянство зазоров, как в осевом, так и в радиальном направлениях. Для реализации данного условия на этапе проектирования инструмента целесообразно предусмотреть базирование роликов друг по другу, как правило, верхнего по нижнему;
- установочные втулки и формирующие ролики должны иметь соответствующую маркировку, причем маркировка должна быть доступна для проверки правильности установки инструмента на стан.

Главной особенностью рабочих калибров для метода интенсивного деформирования является замкнутый по всему периметру рабочий контур (закрытый калибр) на всех переходах, как окончательных, так и предварительных. Замыкание рабочего контура, осуществляемое по торцам калибров, обеспечивается специальными конструктивными элементами двух типов: буртами, применяемыми при горизонтальном расположении краевых элементов профиля, и уступами – при их вертикальном расположении (рис. 4.20).

Бурты охватывающих роликов следует проектировать в виде выступов толщиной 15...25мм со скруглением по радиусу не менее 3мм. Величина прямолинейных, сопряженных с верхним роликом, участков буртов должны обеспечивать их перекрытие по высоте не менее 4...6 мм.

Равномерность боковых (вертикальных) зазоров в калибре, исключение возможности относительного смещения роликов в осевом направлении обеспечиваются соединением верхнего и нижнего роликов торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадкой "в замок" по H7/h7 на окончательном и предварительных переходах. Нижний ролик при этом, как правило, является охватывающим базовым, верхний – охватываемым. В ряде случаев для переходов предварительного формообразования при небольших углах подгибки и надежной фиксации полосы в направляющем устройстве допустимо применение открытых калибров, не имеющих ограничений по торцам. Однако применение закрытых калибров предпочтительнее благодаря лучшему центрированию заготовки, равномерности зазора в калибре, интенсификации формообразования.

Рассмотренные в связи с условиями замыкания калибров виды базирования и взаимного базирования роликов в реальности являются весьма важными составляющими технологии. При прочих равных условиях (выполнение предписанных функций обеспечения качества профиля) базирование и взаимное базирование определяют и стабильность технологического процесса, время переналадки, требования к обслуживающему персоналу. Вопросам базирования роликовой оснастки следует придавать самое серьезное значение при разработке новых видов профилегибочного оборудования. Недостаточно отработанные вопросы базирования при изготовлении оборудования существенно осложняют работу технологов, занимающихся отладкой процессов формообразования профилей.

Для базирования роликов в радиальном направлении следует предусмотреть в конструкциях роликов базовые поверхности, фиксирующие заданную величину радиального зазора в калибре. В качестве баз рекомендуется использовать ступицы и бурты роликов. Требования по механообработке этих элементов такие же, как и для рабочего контура роликов.

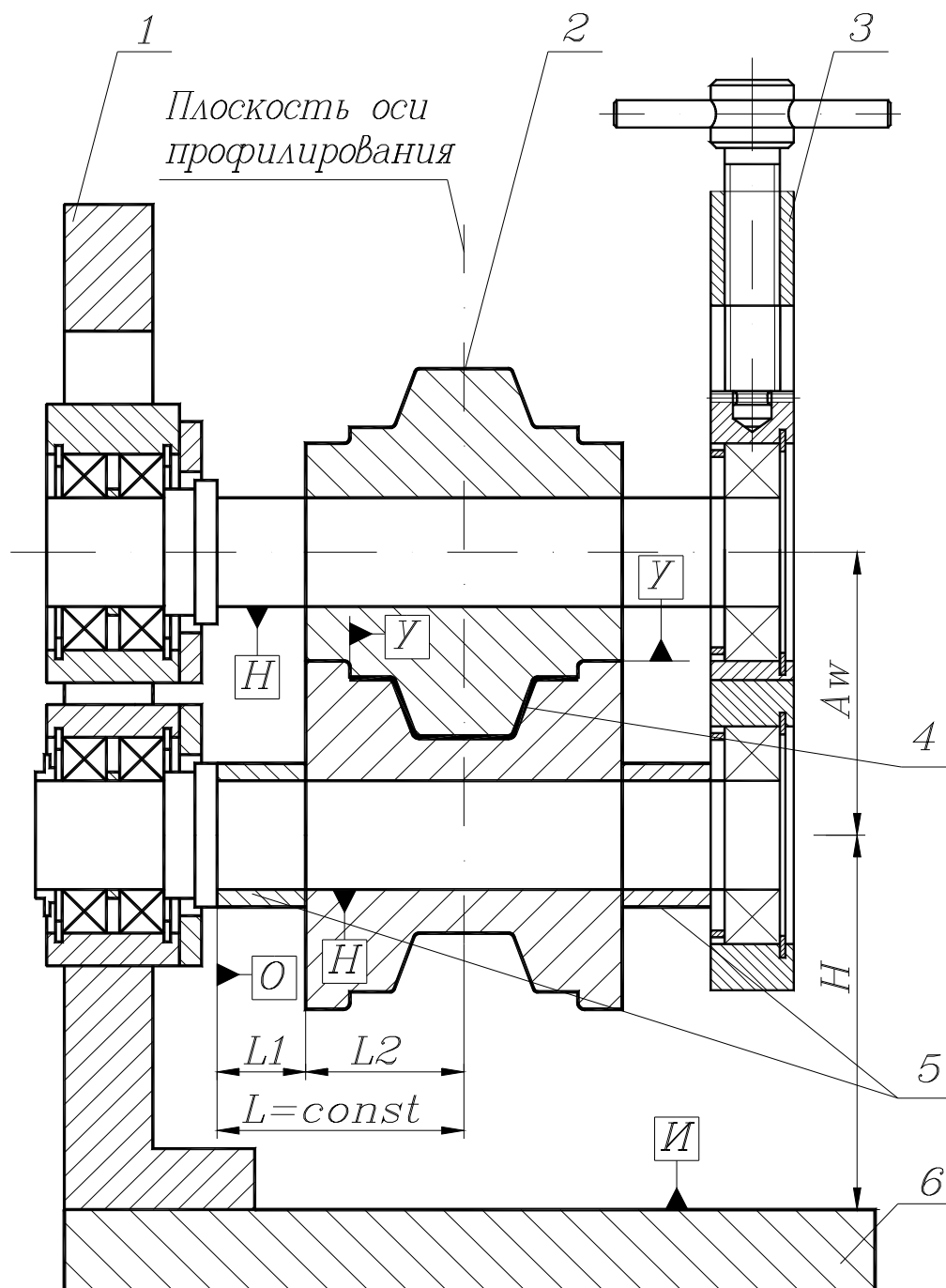


Рис. 4.19. Установка оси профилирования и базирование поверхностей: 1 – клеть профилегибочного стана, 2 – формирующий инструмент, 3 – серьга замыкающая, 4 – заготовка, 5 – установочные втулки, 6 – станина; О – опорная база, Н – направляющая база, У – установочная база, И – измерительная база

При определении количества роликовых пар в комплекте оснастки (переходов гибки) и проектировании рабочего контура роликовых пар следует основываться на выбранной схеме формообразования профиля, при этом рекомендуется располагать профиль полками вверх.

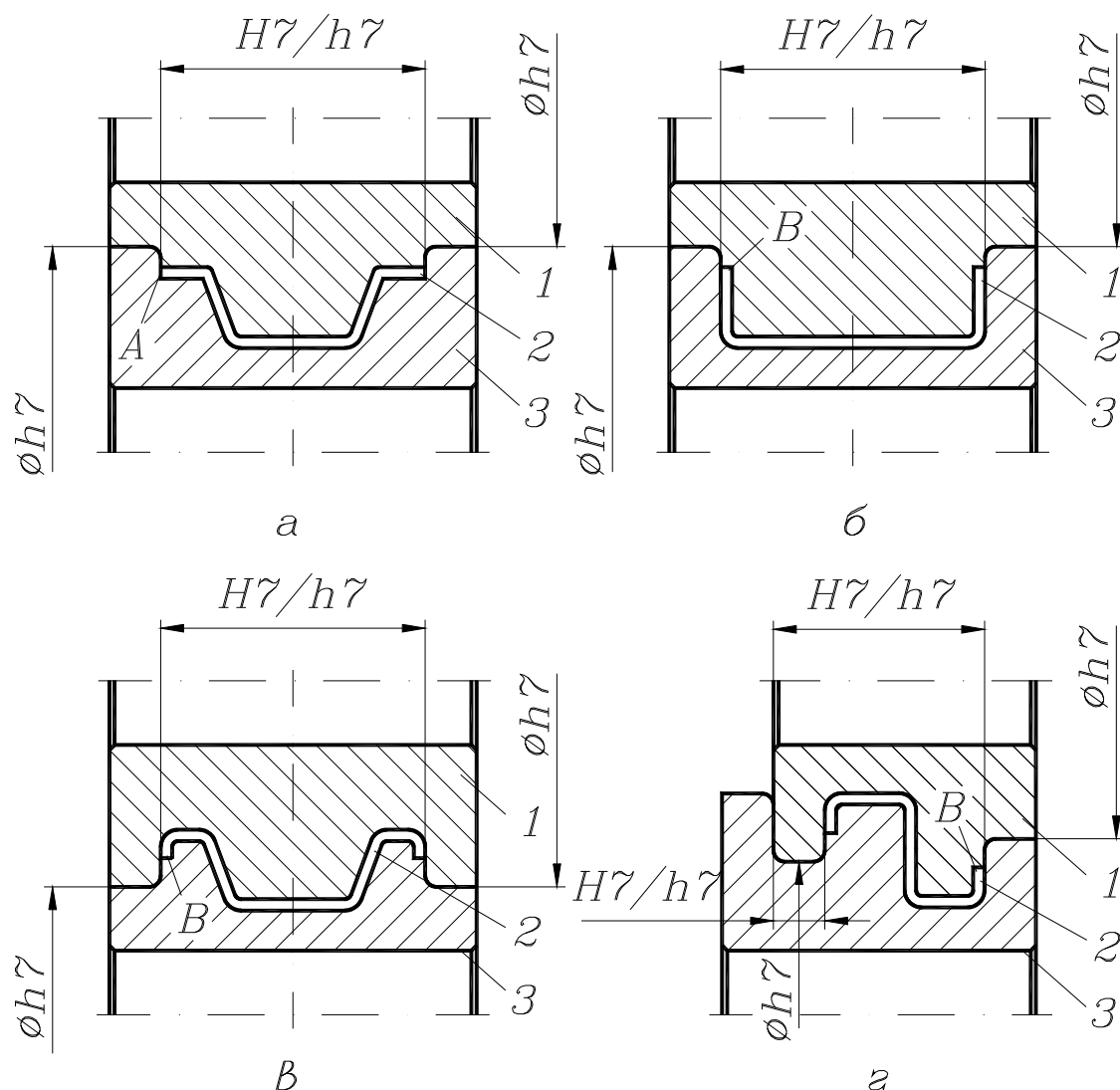


Рис. 4.20. Калибр для метода интенсивного деформирования:

1 – верхний ролик, 2 – заготовка, 3 – нижний ролик; А – бурты,

В – уступы

На первом переходе гибки эффективно применение профилирующих роликов с вертикальными осями для создания направленной потери устойчивости при торцевом (поперечном) сжатии заготовки (рис. 4.21). Благодаря широкому диапазону регулировки межцентрового расстояния в первой клетке станка ГПС-350М и отсутствию верхнего формующего инструмента ролики являются широкоуниверсальными и могут быть использованы при формообразовании однотипных профилей с различной шириной и толщиной заготовки.

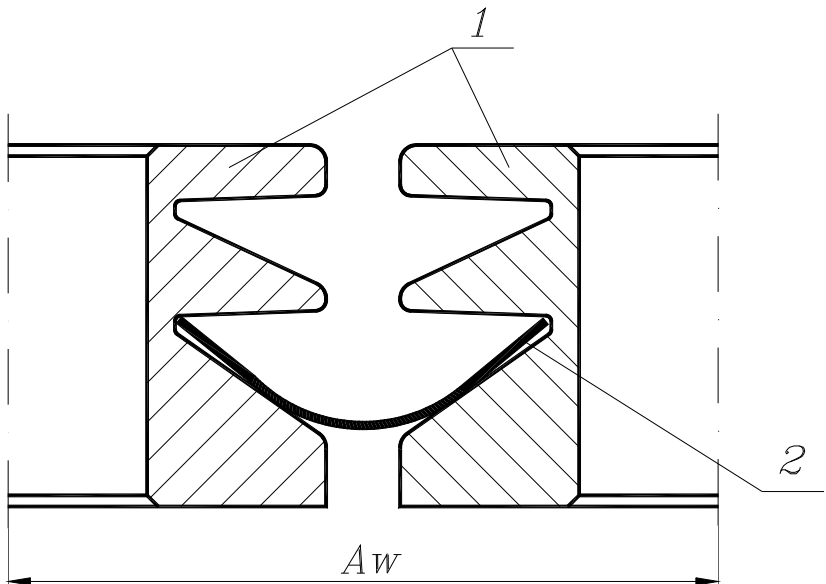


Рис. 4.21. Ролики с вертикальными осями для придания заготовке направленной потери устойчивости: 1 – ролики, 2 – заготовка

Конструктивно ролики технологических переходов могут быть выполнены цельными или сборными (рис. 4.22).

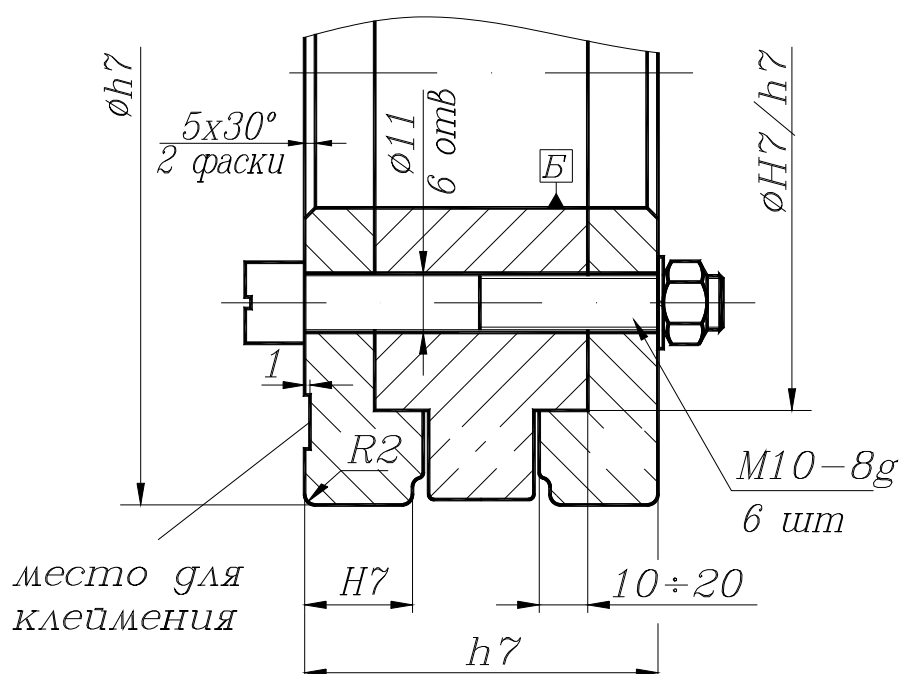


Рис. 4.22. Конструкция сборного ролика

Применять конструкции сборных роликов рекомендуется в следующих основных случаях:

- 1) Невозможно или трудно обработать рабочую поверхность инструмента.
- 2) Сборные ролики рекомендуется изготавливать в случае необходимости изготовления гаммы одностипных профилей, например профили швеллерного типа с различной шириной донной части.
- 3) Конструкция сборных роликов рекомендуется в случае частой замены быстроизнашивающейся рабочей части ролика.

К основным достоинствам закрытого калибра можно отнести следующее:

- интенсификация процесса профилирования;
- устойчивость процесса формообразования гнутых тонкостенных профилей;
- замкнутый по всему периметру калибр обеспечивает точность поперечного сечения профиля;
- удобство в процессе изготовления инструмента (возможность контролировать зазор в паре роликов);
- удобство установки роликов на стан.

Основным недостатком инструмента такой конструкции является сложность его изготовления.

4.12. Материалы для изготовления инструмента

В табл. 4.2. приведены химические составы материалов, рекомендуемых для изготовления профилегибочного инструмента.

Приведем характеристику материалов по каждому виду профилегибочного инструмента с указанием его термической обработки:

- 1) Сталь 20 – входные направляющие планки с цементацией и закалкой рабочих поверхностей до твердости HRC = 60...63, а также дистанционные втулки без термообработки.
- 2) Сталь 20X – оси вспомогательных роликов с цементацией и закалкой до твердости HRC = 60...63.
- 3) Сталь 40X – оси вспомогательных роликов, направляющие планки, оправки с закалкой до твердости HRC = 42...46.
- 4) 9X, 9XBГ, XBГ – формовочные валки сложной конфигурации, применяются после термической обработки с твердостью HRC = 55...59.
- 5) 9XC – формовочные валки сложной конфигурации, применяется после закалки с твердостью HRC = 58...62. Эта сталь является лучшим материалом для изготовления валкового инструмента сложной формы.
- 6) Ст. 45 – формовочные валки простых конфигураций, небольших диаметров, применяются после термической обработки при HRC = 55...59.
- 7) X12M, 9XC – матрицы и пуансоны для резки/рубки профиля, ножи дисковых ножниц для холодной резки рулонных заготовок.

Таблица 4.2

Стали применяемые для изготовления профилирующего инструмента

Марка стали	Химический состав, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	S	P
	не более									
20	0.15-0.25	0.35-0.65	0.17-0.37	—	—	—	—	—	0.045	0.045
20X	0.15-0.25	0.30-0.60	0.17-0.37	0.70-1.00	≤0.30	—	—	—	0.04	0.04
40X	0.35-0.45	0.50-0.80	0.17-0.37	0.80-1.10	≤0.30	—	—	—	0.04	0.04
9X	0.80-0.95	0.25-0.35	0.25-0.45	1.40-1.70	≤0.30	—	—	—	0.03	0.03
9XBГ	0.85-0.95	0.90-1.20	0.15-0.35	0.50-0.80	≤0.35	0.50-0.80	—	≤0.30	0.030	0.030
XBГ	0.90-1.05	0.80-1.10	0.10-0.40	0.90-1.20	≤0.35	1.20-1.60	—	≤0.30	0.030	0.030
9XC	0.85-0.95	0.30-0.60	1.20-1.60	0.95-1.25	≤0.35	≤0.20	≤0.15	≤0.20	0.030	0.030
Ст. 45	0.42-0.50	0.50-0.80	0.17-0.37	0.30	0.30	—	—	—	0.030	0.030
X12M	1.45-1.70	≤0.35	≤0.4	11.0-12.5	≤0.35	—	0.15-0.30	0.50-0.80	0.030	0.030

Примечание:

Механические характеристики указанных сталей можно найти в многочисленных справочных изданиях по машиностроительным сталям.

4.13. Алгоритм разработки технологии изготовления профиля

Разработка технологии интенсивного деформирования для группы профилей различных типов под заказ связана с учетом технических и экономических факторов. На рис. 4.23 приведен укрупненный алгоритм разработки технологии изготовления тонкостенного профиля на основе метода интенсивного деформирования, охватывающий все этапы проектирования и принятия решений до стадии изготовления оснастки.

Алгоритм предусматривает определенную последовательность этапов разработки технологии, выраженной в соответствующих совокупностях его блоков. Краткое описание этапов разработки приведено ниже.

На первом этапе после ввода (получения) данных об изготавливаемом профиле проводят анализ его технологичности [171, 182].

На втором этапе определяют расположение профиля в роликах по переходам, устанавливают систему калибровки и способа формовки и проводят расчеты числа переходов, схем формообразования и т. д. с принятием соответствующих технических решения при отклонениях от стандартного процесса проектирования.

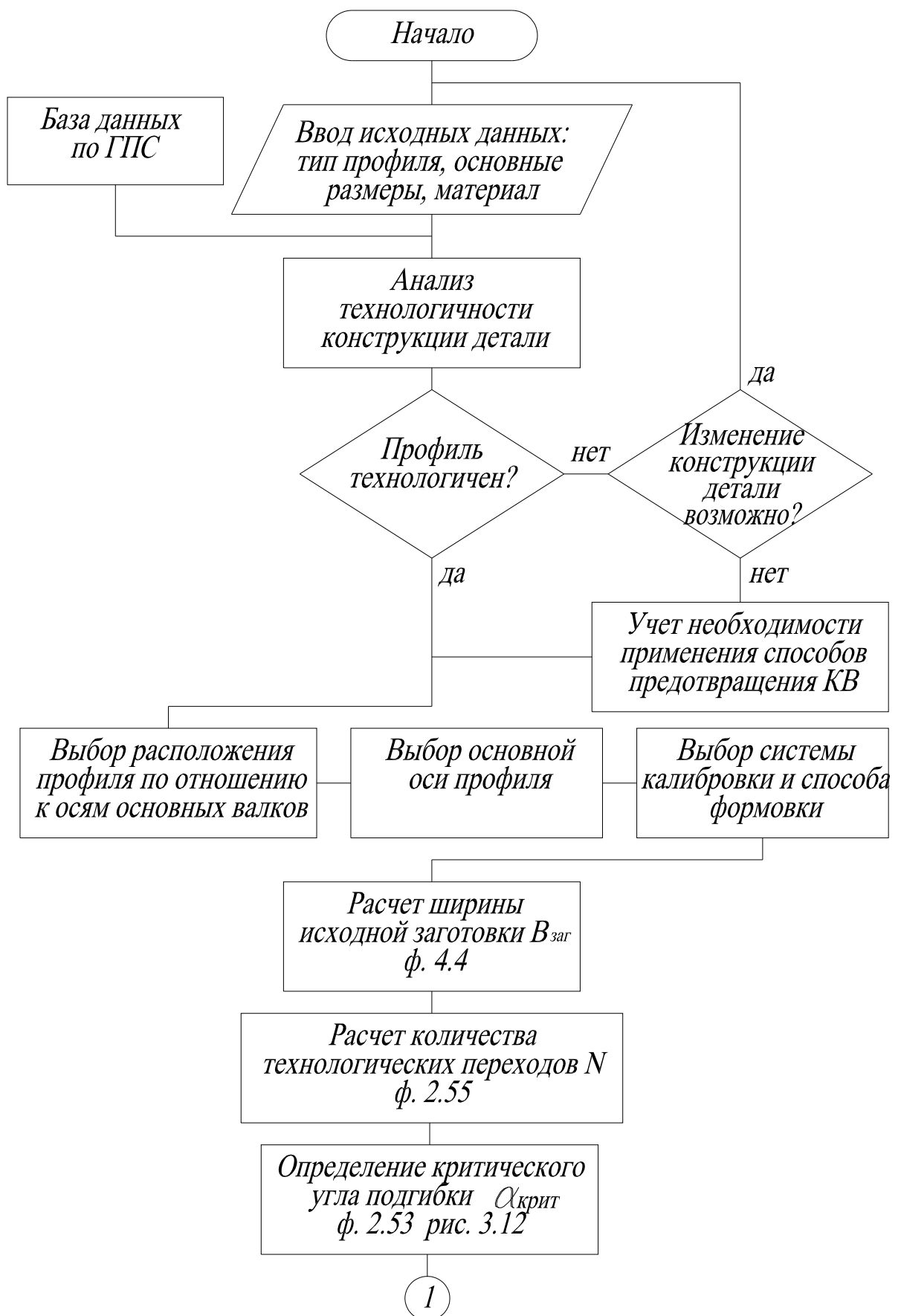
На следующем этапе производят выбор подходящего станка, а в случае необходимости создания нового оборудования производят расчет его основных параметров.

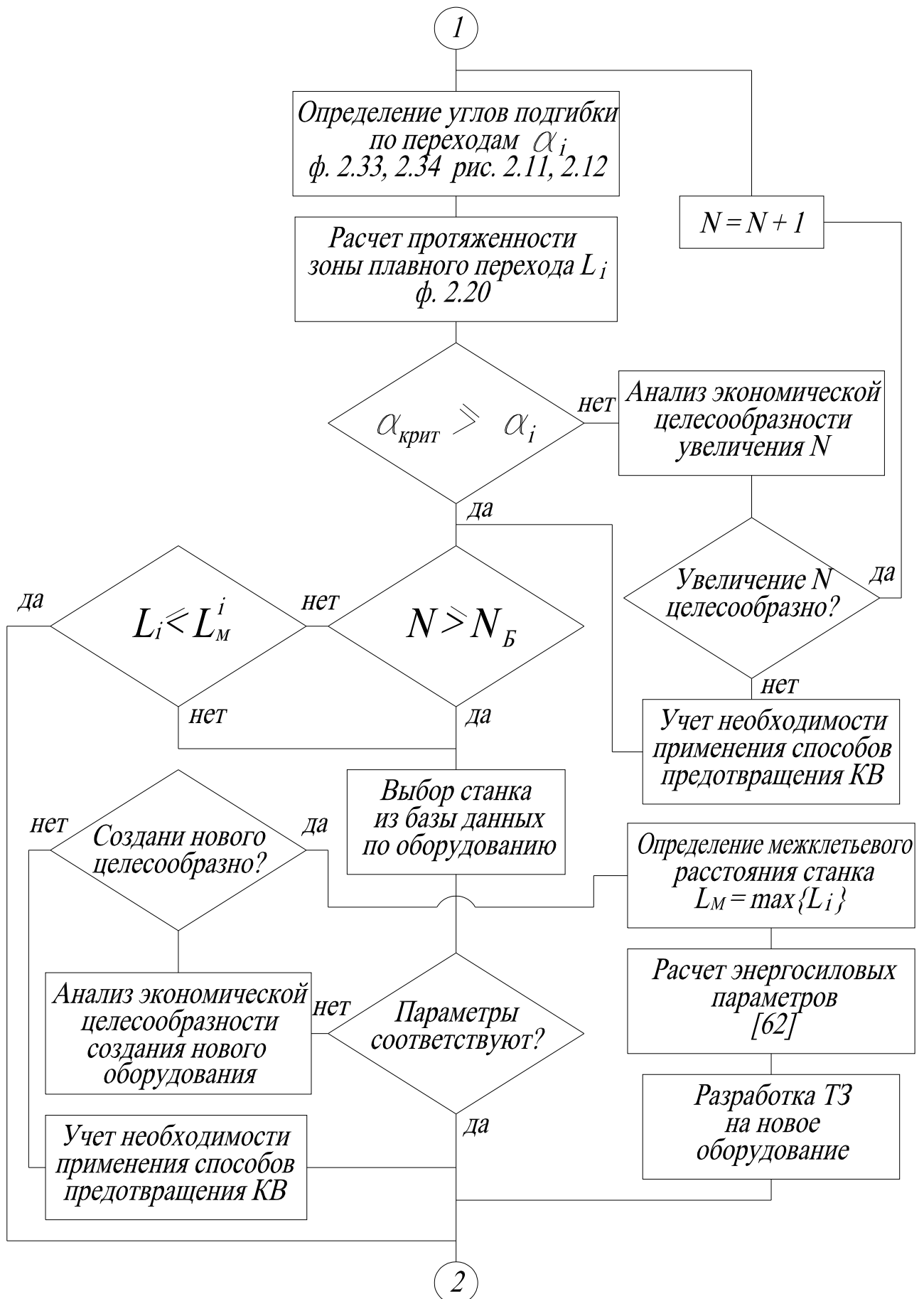
На очередном этапе выполняют расчет калибров и параметров пружинения [178].

На заключительном этапе в случае необходимости производят выбор способа предотвращения кромковой волнистости [183, 184, 185]. Некоторые способы предотвращения кромковой волнистости описаны ранее, другие являются предметом ноу-хау. В качестве примера можно отметить, что тонкостенный профиль С-образной формы с 22 зонами сгиба фирмы «Кнауф» (см. рис. 1.15), изготавливаемый за рубежом за 18 – 20 переходов, был получен на станке ГПС-350М6 за шесть переходов.

Приведенный алгоритм включает практически все полученные в работе модели и при более подробной разработке и формализации некоторых проектных процедур может быть использован в системе автоматизированного проектирования технологии метода интенсивного деформирования [172].

Следует отметить, что на основе разработанных одним из авторов данной книги моделей стесненного изгиба была разработана САПР проектирования технологической оснастки на основе АСAD версии 12 с выводом чертежей на плоттер формата А3. Система охватывала номенклатуру типовых профилей уголкового, швеллерного, корытного и зетового сечений и функционировала с 1994 по 1998 год.. Причинами изъятия системы из процесса проектирования были: 1) расширение номенклатуры профилей, в которой типовые профили занимали только (5 – 10) %; 2) устаревающая платформа программного пакета.





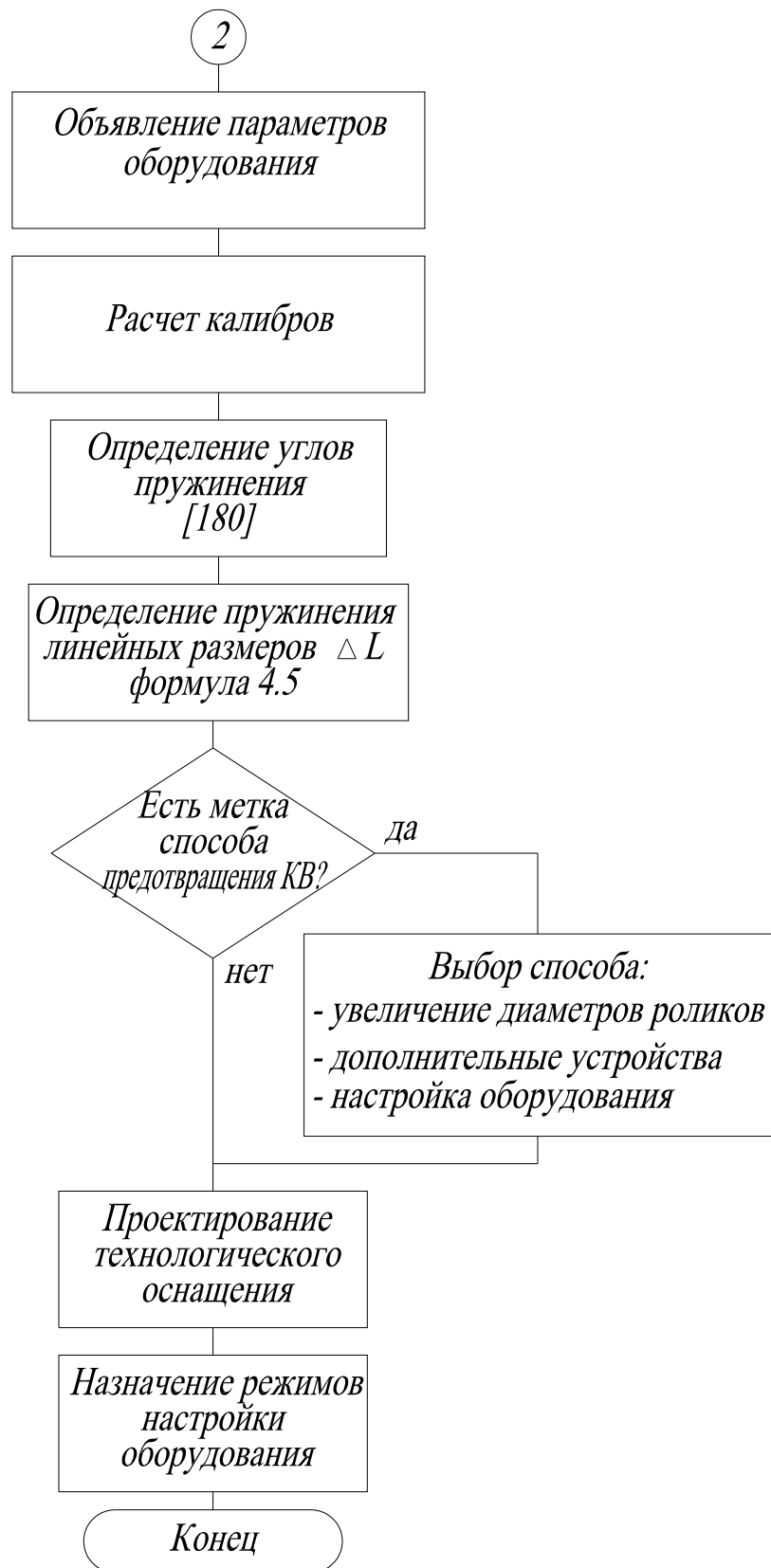


Рис. 4.23. Алгоритм разработки технологии изготовления профиля

4.14. Пример разработки технологии перфорированных уголков

В последние годы в промышленности и особенно в строительстве востребованы длинномерные перфорированные (просечные) профили [186]. Технология производства таких профилей, ориентированная на их изготовление в роликах профилегибочных машин, может иметь различные варианты сочетаний процессов перфорации и собственно профилирования:

1. Перфорация ленты в штампе – профилирование в роликах.
2. Перфорация ленты в роликах – профилирование.
3. Профилирование ленты – перфорация в штампах (роликах).

Преимущество первого процесса состоит в возможности обеспечения высокой точности размеров пробиваемых отверстий и их расположения. Однако отверстия значительных размеров могут существенно осложнять процесс профилирования в отношении обеспечения размерной точности отверстий и самого профиля: размеры отверстий могут изменяться; ослабление сечения может приводить к поводкам (прогиб, скрутка) или же локальной потере устойчивости (кромковая волнистость, излом полок).

Второй процесс может быть реализован двумя преимущественными способами: 1) перфорация в роликах перед профилированием (например, в первых клетях на горизонтально плоских участках); 2) комбинированным способом, когда перфорация осуществляется перед собственно профилированием на участках заготовки, подлежащих подгибке, и в срединных клетях на неподгибаемых элементах. В этом случае возможна некоторая диверсификация процесса, например, перфорация в последних клетях, перфорация на наклонных подгибаемых элементах. Однако все комбинации данного процесса связаны с понижением параметров точности изготавливаемого профиля, усложнением технологической оснастки, снижением стабильности технологического процесса.

Перфорация профиля в штампах или роликах после его формообразования хотя и возможна, однако она имеет существенные ограничения: перфорирование возможно лишь на открытых участках (преимущественно донная часть профиля или горизонтальные полки). В отличие от первых двух процессов здесь не предусматривается своего рода калибровка профиля в роликах, которая сглаживает мелкие дефекты типа локальной вытяжки вблизи отверстия при притуплении матриц и пуансонов, поводок, возникающих вследствие перераспределения остаточных напряжений и т. д.

В данной работе рассматривается процесс профилирования предварительно перфорированной ленты с относительно крупными отверстиями на подгибаемых элементах при жестких допусках на размеры отверстий и их топологию. Исследуется влияние режимов формообразования на деформационные параметры подгибаемых элементов и отверстий в них.

Исследования проводили на перфорированном профиле (рис. 4.24, табл. 4.3) из оцинкованной стали 08кп, к которому предъявляются жесткие требования по диаметрам отверстий (отклонения по диаметру не должны превышать 0,1 мм). Применяли метод интенсивного деформирования заготовки в роликах преимущественно с жестким режимом формовки угловой зоны (постоянный радиус гиба по всем переходам) [187]. В качестве оборудования использовали автоматизированную линию производства перфорированных профилей, основным агрегатом которой является гибочно-прокатный станок ГПС-300М6 (рис. 4.25) с характеристиками, указанными в табл. 4.4.

Таблица 4.3
Параметры уголка

Параметр	Размерность	Значение
b	мм	35
d	мм	10
I	мм	25
s	мм	1,6
r _в	мм	4
α	град.	90
g	мм	5

Таблица 4.4

Технические характеристики станка ГПС-300М6

№ п/п	Наименование параметра и его размерность	Значение параметра
1.	Число клетей, шт	6
2.	Межклетьеовое расстояние, мм	400
3.	Межосевое расстояние, мм	120...160
4.	Диаметр рабочих валов, мм	50
5.	Базовые диаметры роликов, мм	90
6.	Скорость профилирования, м/мин	8
7.	Вспомогательные устройства: Направляющее и правильное, шт.	2

Потребное число переходов N при использовании метода интенсивного деформирования (МИД) подсчитывали в соответствии с моделью [187]:

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos \alpha)}{L_M \cdot n}} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_b \cdot s}} \right)^{1/2} \right], \quad (4.6)$$

где F – функция формы, равная 3,2 для уголкового профиля; L_M – межклетьеовое расстояние профилегибочного станка, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм; α – суммарный угол подгибки боковых полок, град; C – ширина дна (здесь: зоны сгиба) профиля, мм; R – средний радиус гиба, соответствующий 95% уровню охвата зоны сгиба пластическими деформациями, мм; r_в – внутренний радиус зоны сгиба, мм; s – толщина заготовки, мм; n – число зон сгиба профиля.

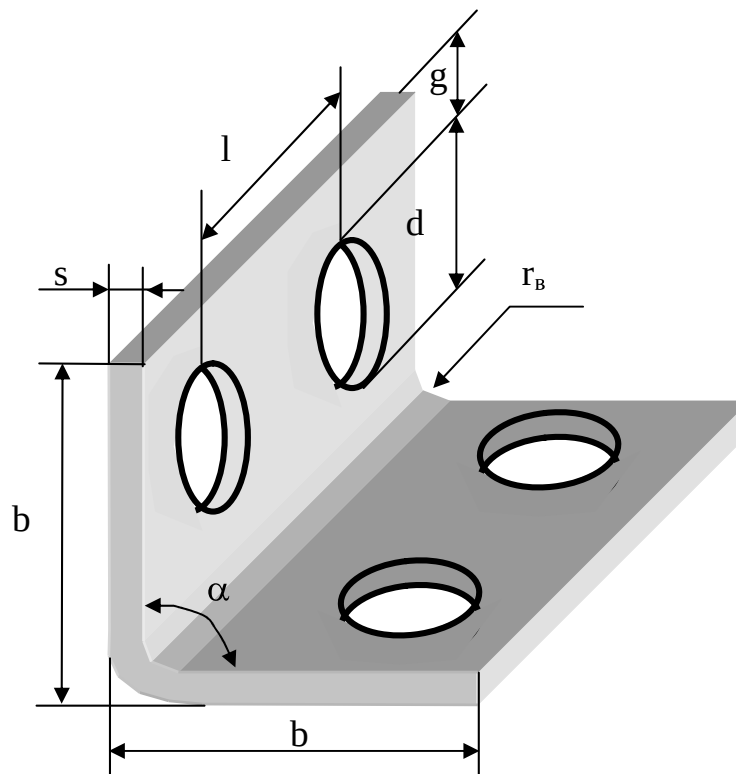


Рис. 4.24. Эскиз перфорированного уголка

На рис. 4.26, построенном с помощью пакета MathCad – 2001 Pro в соответствии с моделью (1), показана процедура определения потребного числа переходов, подлежащего округлению в сторону увеличения, что составляет пять переходов.

В постановочном эксперименте была предпринята попытка изготовления профиля за четыре перехода, причем первые три были открытыми, в которых кривизна зоны сгиба составляла $4s$, а в последнем, закрытом, калибре с вертикальным замыканием достигалась заданная кривизна внутреннего контура зоны сгиба. При этом происходило изменение размеров отверстий на $(2 - 3) \%$ с их преобразованием в эллиптическую форму и расположением большей оси под углом около 30° по отношению к продольной оси. Отклонения по размерам диаметра превышали допустимые значения отклонений в 2 – 3 раза. Кроме того, присутствовала продольная кривизна в пределах 4 – 6 мм/м. В этой связи была принята ориентация на технологию изготовления профиля за пять переходов в закрытых калибрах с целью обеспечения размерной точности отверстий и предотвращения поволоки профиля.

Исследования проводили на комплектах роликов с различными видами замыкания калибров (рис. 4.27) для выявления особенностей формообразования уголковых профилей с отверстиями.

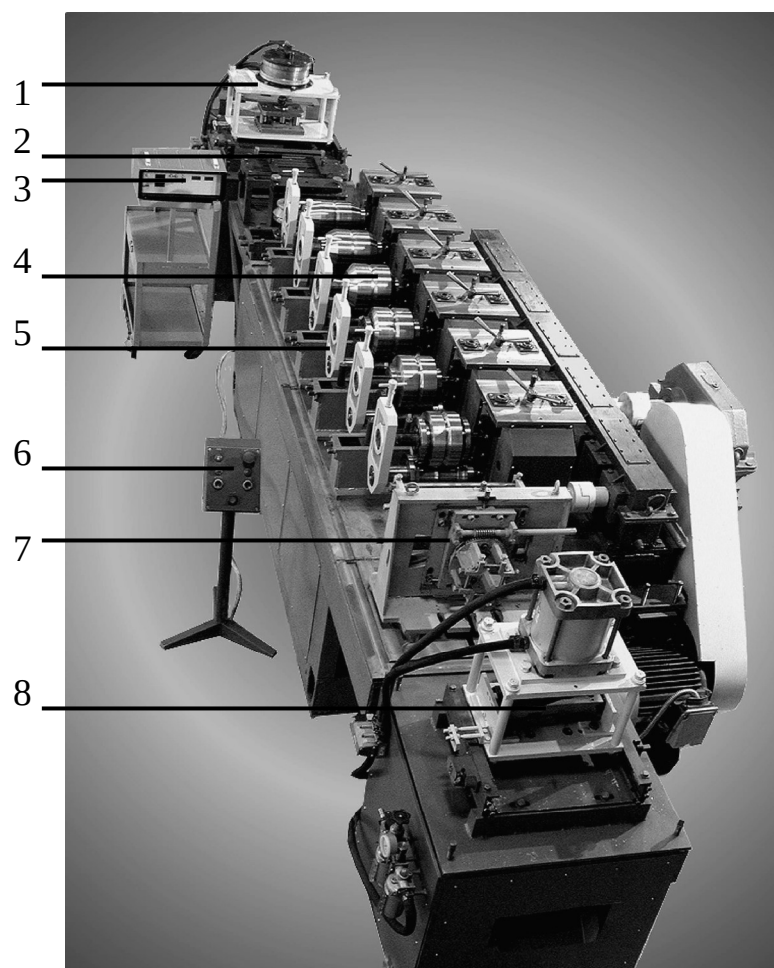


Рис. 4.25. Гибочно-прокатный станок ГПС-300М6: 1 – перфоратор; 2 – направляющее устройство; 3 – отсчитывающее устройство; 4 – формующий ролик верхний; 5 – серьга замыкающая; 6 – пульт управления; 7 – правящее устройство; 8 – летучий штамп отрезной

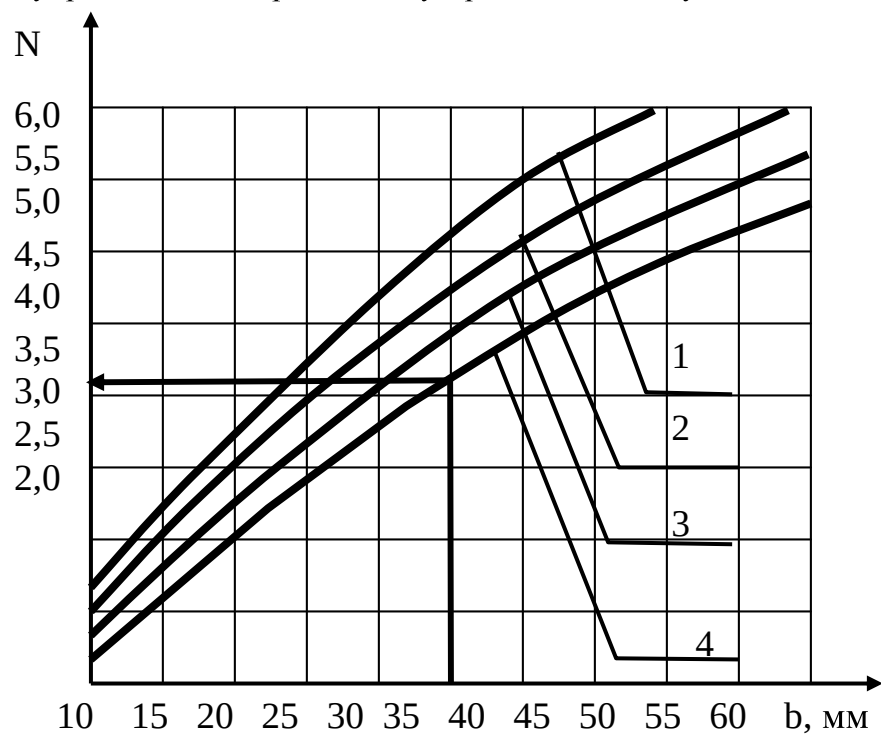


Рис. 4.26. График определения числа переходов:
1, 2, 3, 4 – $s = 0,7; 1,0; 1,3; 1,6$ мм соответственно

Схема «а» (рис. 4.27) оказалась мало приемлемой: при малых углах подгибки (менее 30°) происходило легкое фланирование заготовки в поперечном направлении, наблюдалась тенденция к закусыванию ее торцевых участков. На двух последних переходах торцевой уступ нижнего ролика вызывал изгиб заготовки в продольной плоскости калибра и изменял размер отверстий до 3 %.

Схема «б» (рис. 4.27), осуществлявшаяся по режиму подгибки $10^\circ - 20^\circ - 30^\circ - 40^\circ - 45^\circ$, была принята в качестве основной и подвергнута более тщательному исследованию. Формуемую заготовку извлекали из калибров, разрезали по местам осевых плоскостей калибров (рис. 4.28а), сканировали плоские участки полок для определения главных осей деформированных эллипсов в увеличенном масштабе в среде AutoCAD – 2000 с использованием «эластичных шаблонов» (рис. 4.28б). При этом определяли угол β между большей осью эллипса и кромкой заготовки. Затем под найденным углом с помощью угломера производили трассировку большей оси окружности, а перпендикулярно ей – трассировку меньшей оси. Измерение размеров отверстий производили с помощью электронного штангенциркуля с погрешностью 0,01 мм при пятикратном измерении каждого из размеров с последующим осреднением. Для каждого отверстия производили расчет логарифмических деформаций e_1 , e_2 для большей и меньшей осей соответственно, которым на рис. 4.29 соответствуют их абсолютные значения с условными обозначениями $D_{6.3}(D_6)$, $D_{м.3}(D_m)$. Обозначениям в круглых скобках соответствуют кривые, полученные полиномиальной аппроксимацией экспериментально-расчетных данных в среде EXCEL – 2000 Pro. Аналитические зависимости деформаций от текущего номера перехода (или координаты, отсчитываемой вдоль оси профилирования) имеют вид:

$$e_1 = -1.536 \cdot 10^{-3} \cdot N_T^2 + 0.014 \cdot N_T - 0.0074, \quad (4.7)$$

$$e_2 = 2.56 \cdot 10^{-3} \cdot N_T^2 - 0.016 \cdot N_T + 0.0077, \quad (4.8)$$

где N_T – текущий номер перехода.

Уравнения (4.7) и (4.8) в целом соответствуют условию несжимаемости материала заготовки $\sum_{i=1}^3 e_i = 0$ для плоского деформированного состояния с увеличением «невязки» при движении к последней клетки профилегибочного станка. Из рис. 4.29 видно, что деформация отверстий имеет тенденцию к росту с увеличением номера перехода и наиболее значительные всплески деформаций проявляются вблизи осевой плоскости роликов. Более тщательный анализ процесса показал, что столь значительные деформации полки возникают из-за воздействия на нее силы P под углом к ее кромке со стороны замыкающих буртов нижних роликов перед осевой плоскостью роликового калибра.

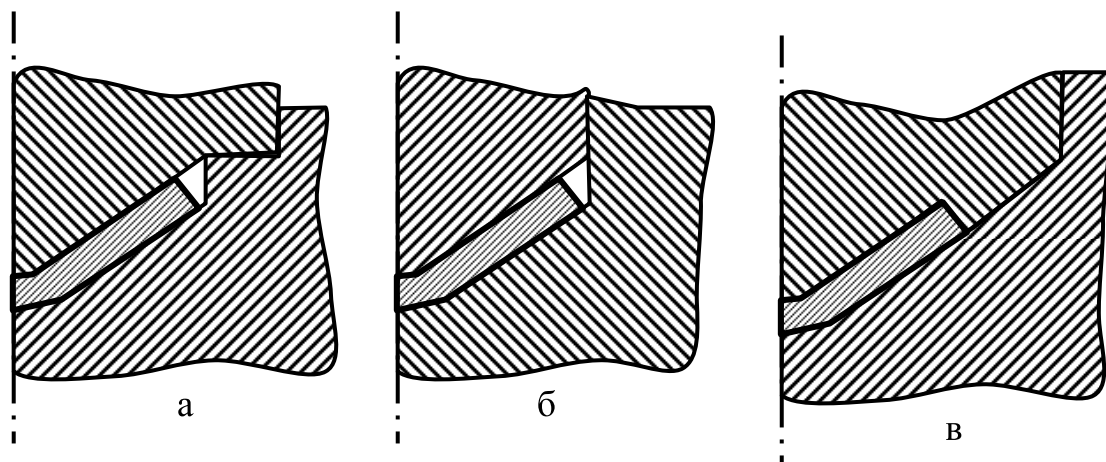


Рис. 4.27. Замкнутые роликовые калибры: а – с горизонтальным замыканием; б – с вертикальным замыканием; в – с коническим замыканием

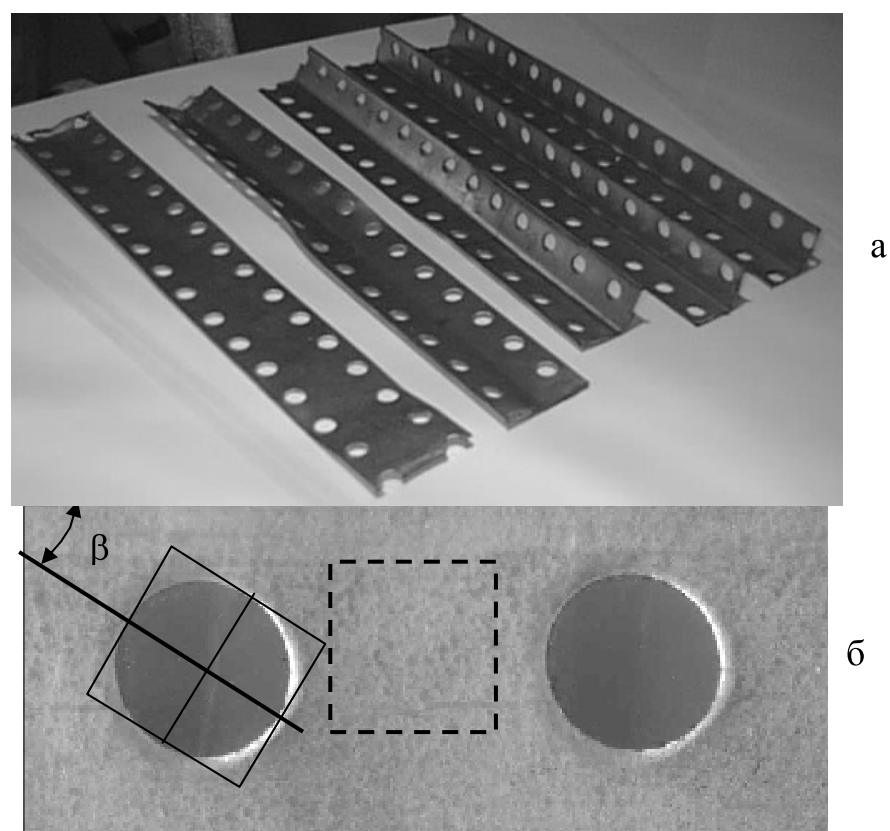


Рис. 4.28. Изучение размеров отверстий: а – образцы для исследований; б – определение главных направлений деформаций

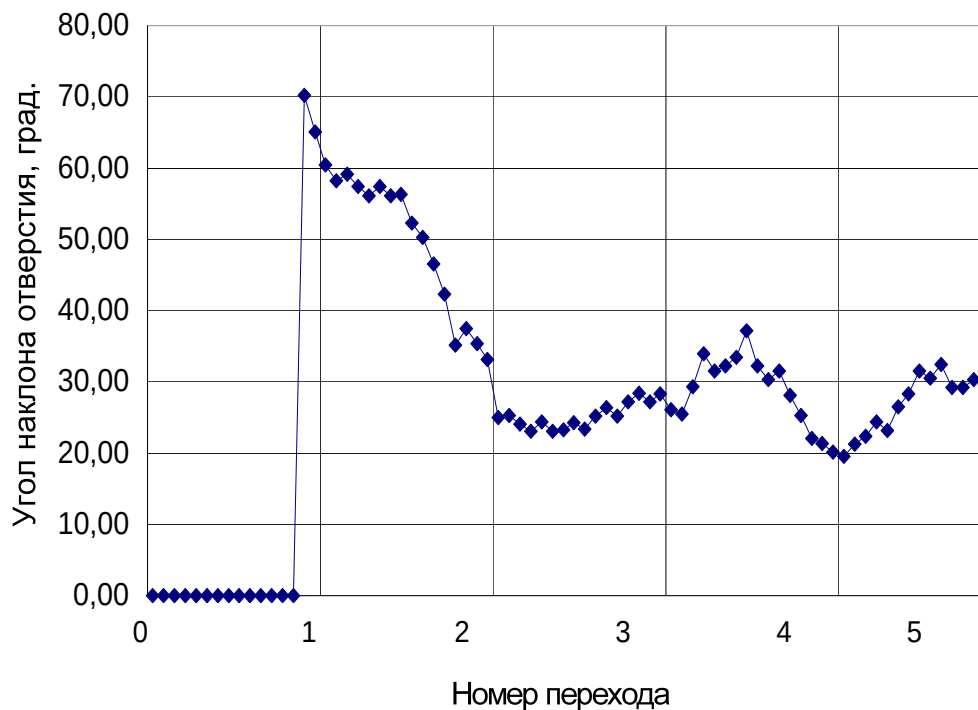


Рис. 4.29. Степени деформаций полки по переходам

Действие этой силы приводит также к изгибу заготовки в целом перед осевой плоскостью. В результате часть полки, находящаяся в очаге пластической деформации, оказывается нагруженной в дополнение к схеме плоских разноименных напряжений и касательными напряжениями. На первых переходах действие описанной схемы нагружения проявляется наиболее ярко (см. рис. 4.29 и 4.30), а к последним переходам происходит небольшое снижение деформаций вследствие изменения точки приложения силы **P** (рис. 4.31). С увеличением угла подгибки также изменяется величина и направление действия силы **P** вследствие изменения суммарного угла подгибки. При этом угол поворота большей оси эллипса имеет тенденцию к уменьшению (см. рис. 4.30). Накопленные деформации хотя и несколько уменьшаются к последнему переходу, однако размеры отверстий выходят за допустимые пределы. Надлежит заметить, что профиль той же геометрии сечения, полученный по данной технологии из сплошной заготовки не имел дефектов.

Для снижения деформаций полки путем устранения влияния буртов роликов была опробована схема замыкания роликов с коническими участками (рис. 4.27в). Протяженность конического участка брали шириной не менее величины одностороннего сужения/стеснения профиля, что определяется шириной полки и приращением угла подгибки в текущем переходе [153]. В этом случае устранялась тангенциальная составляющая силы **P**, влиявшая в предыдущей схеме на вид деформированного состояния и изгиб профиля. Режимы подгибки полок оставались теми же, что и в схеме рис. 4.27б. Контроль отверстий по переходам и на готовом профиле производили калибрами-пробками,

изготовленными для контрольных операций в серийном производстве. Изготовленная контрольная партия профилей (около 500 погонных метров) не имела отклонений от требований чертежа.

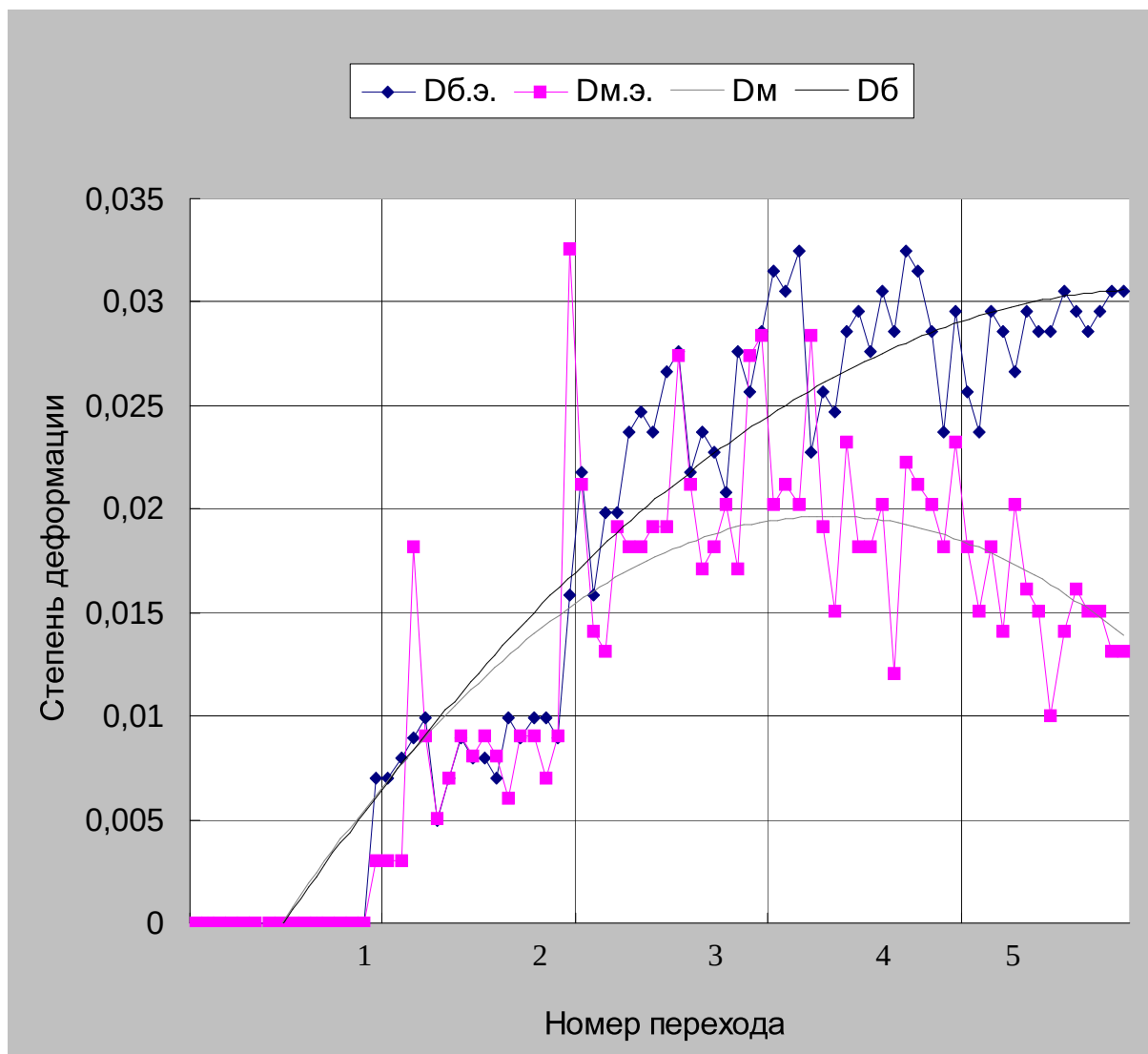


Рис. 4.30. Поворот большой оси эллипсов относительно кромки

Из сравнения описанных технологий следует, что замыкание роликовых калибров с конической посадкой является предпочтительным. При наличии крупных отверстий торцевое поджатие (при использовании метода интенсивного деформирования или стесненного изгиба) следует практиковать с большой осторожностью, поскольку в этом случае возможно изменение фор-

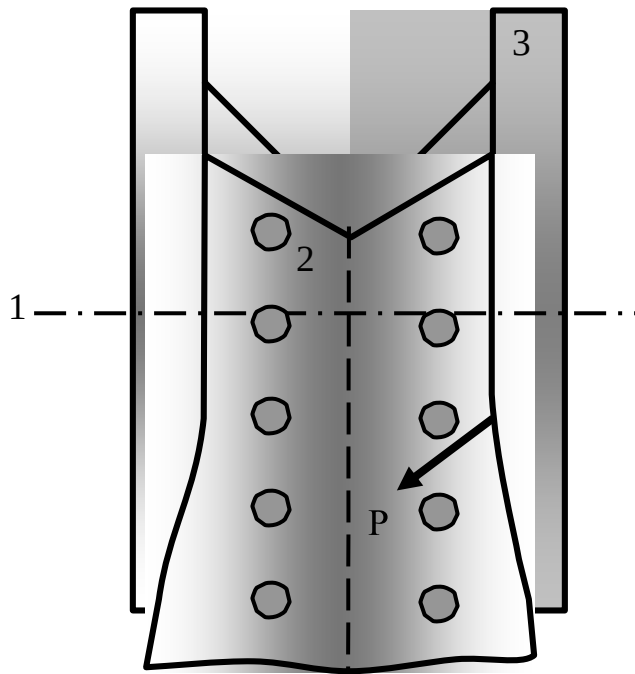


Рис. 4.31. Действие бурта ролика:
1 – осевая плоскость; 2 – заготовка;
3 – бурт ролика

мы отверстия, потеря устойчивости заготовки или возникновение дефектов типа «локального продавливания». Аналитическое исследование поведения перфорированной заготовки в межклетьевом пространстве сталкивается с нарушением условия сплошности заготовки, однако, по нашему мнению, эту проблему можно отчасти обойти, заменив заготовку эквивалентной сплошной, той же толщины, но с увеличенным размером полки на приведенную величину удаленного перфорацией материала. Возможна эквивалентная замена перфорированной заготовки сплошной заготовкой меньшей толщины с сохранением размера полки. Изложенные гипотезы подлежат проверке численным моделированием с помощью метода

конечных элементов и экспериментальным исследованием процессов профилирования. В то же время вопрос преемственности технологии производства профилей из сплошных заготовок для производства перфорированных профилей остается весьма настоятельным.

Из рассмотренного процесса можно сделать следующие выводы:

1. При производстве перфорированных профилей следует отдавать предпочтение процессу, предусматривающему предварительную пробивку отверстий и последующее профилирование.
2. В схеме замыкания роликового калибра надлежит предусматривать конический участок, шириной не менее величины одностороннего сужения/стеснения профиля, что определяется шириной полки и приращением угла подгибки в текущем переходе.
3. При интенсификации процесса профилирования заготовки с относительно крупными отверстиями следует проявлять особую осторожность в отношении применения торцевого поджатия заготовки.

4.15. Пример разработки технологии изготовления полузакрытых профилей с элементами жесткости из материала с покрытием

На примере характерного профиля рассмотрим подход к проектированию и отработке схем формообразования полузакрытых профилей с элементами же-

сткости, с предотвращением кромковой волнистости элементов профиля и нарушений лакокрасочного покрытия.

В последние годы на рынке отечественных полуфабрикатов резко возрос спрос на профили с элементами жесткости [66], изготавливаемые из материалов с покрытием. Примером может служить полузакрытый профиль типа «стойка», применяемый в строительстве для декоративного обрамления ваннных комнат (рис. 4.32). Профиль содержит элементы двойной толщины на периферийных участках и конструктивный рифт в донной части.

Идентификация параметров исходного сечения профиля (см. рис. 4.32) представлена в табл. 4.5.

Заказчиком технологии предложены два варианта производства профиля: 1) формообразование профиля из материала 08кп без покрытия и его последующее декоративное покрытие; 2) формообразование профиля из ленты с предварительно нанесенным покрытием. Требования к покрытию – отсутствие дефектов покрытия и его стойкость в течение срока эксплуатации. Из соображений снижения себестоимости второй вариант был указан в качестве предпочтительного.

Таблица 4.5

Параметры исходного профиля

Параметр	1 Значение параметра, мм	Параметр	2 Значение параметра, мм
C	37	r_B	1,5 (на рис. 4.30 условно не показан)
b	7	s	0,5
g	12	a	3,7

Факторы, осложняющие процесс формообразования с позиций обеспечения надлежащего качества профиля:

1. Наличие лакокрасочного покрытия, чувствительного к приложению значительных контактных нагрузок;
2. Наличие зон с углами гиба 180° со значительными степенями деформации подложки и покрытия заготовки;
3. Наличие элементов жесткости, усложняющих схему формообразования и в ряде случаев имеющих склонность к потере устойчивости в виде излома.

Указанные факторы требуют решения ряда вопросов: определение числа переходов, минимального радиуса гиба у основания элемента двойной толщины, принятие мер, предупреждающих потерю устойчивости элементов профиля, оптимизация схем формообразования и формы технологического оснащения. Особенности технологии могут быть обобщены и на производство других сходных типоразмеров профилей.

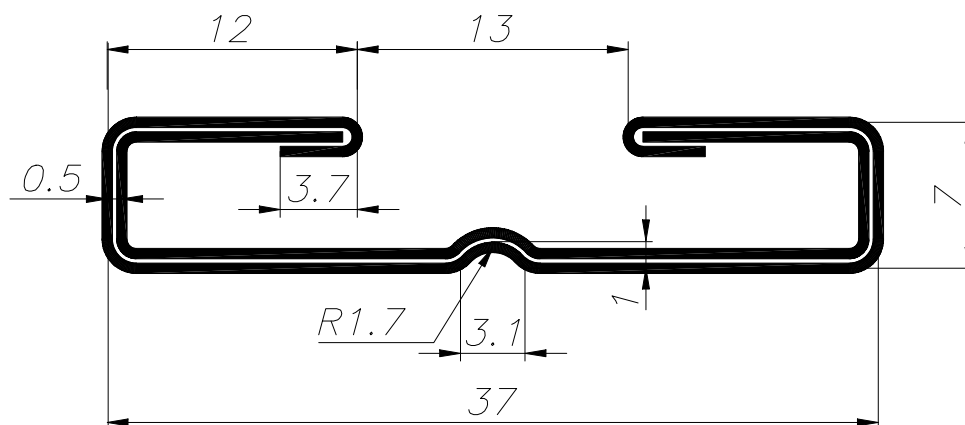


Рис. 4.32. Сечение изготавливаемого профиля

Для определения числа переходов использовали полуэмпирическую модель [153]:

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos \alpha)}{L_M \cdot n} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_b \cdot s}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.9)$$

где F – функция формы; L_M – межклетьеовое расстояние профилегибочного станка, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм; α – суммарный угол подгибки боковых полок, град; C – ширина дна профиля, мм; R – средний радиусгиба, соответствующий 95% уровню охвата зоны сгиба пластическими деформациями, мм; r_b – внутренний радиус зоны сгиба, мм; s – толщина заготовки, мм; n – число зон сгиба профиля.

В формуле (4.9) первый сомножитель в квадратных скобках отражает влияние формы дна заготовки профиля, второй – степень «стеснения» заготовки, третий – жесткость угловой зоны. Функция формы F для C – образных профилей определяется соотношением:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{C + b \cdot \cos \alpha}{C + b \cdot \cos \alpha - g}, \quad (4.10)$$

где g – ширина горизонтальных полок профиля.

В формуле (4.10) коэффициент 3,2 получен калибровкой формулы (4.9) на массиве экспериментальных данных при сквозной прогонке модели по ширине полки.

Формула (4.9) разработана для профилей с гладкими полками, в связи с чем, в расчетах, относящихся к профилю с элементами жесткости, введены следующие процедуры предварительного определения параметров и условий:

1. Функцию формы определяли как для C – образного профиля с гладкими горизонтальными полками, уменьшенными на величину элемента двойной толщины;

2. Ширину подгибаемого элемента брали равным номинальному значению суммарной ширины подгибаемых полок;
3. Ввиду наличия рифта донную часть считали жесткой;
4. Межклетьевое расстояние принимали равным 400 мм – типовым для станков семейства ГПС.

Выбор числа переходов в зависимости от параметров табл. 4.5 производили по рис. 4.33, выполненному с помощью прикладной программы MathCAD – 2001 Pro. В соответствии с пп. 1 и 2 условий, приведенных выше, в расчетах были приняты модифицированные значения ширины горизонтальной и подгибаемой полок g_1 и b_1 соответственно.

По геометрическим параметрам профиля и числу переходов в качестве основного технологического оборудования был определен станок ГПС-300М6.

Схемы формообразования профиля на предварительном и окончательном этапах разработки технологии представлены на рис. 4.34, а соответствующее им распределение углов подгибки элементов профиля по переходам, полученное на основании модифицированной методики работы [153], сведено в табл. 4.6.

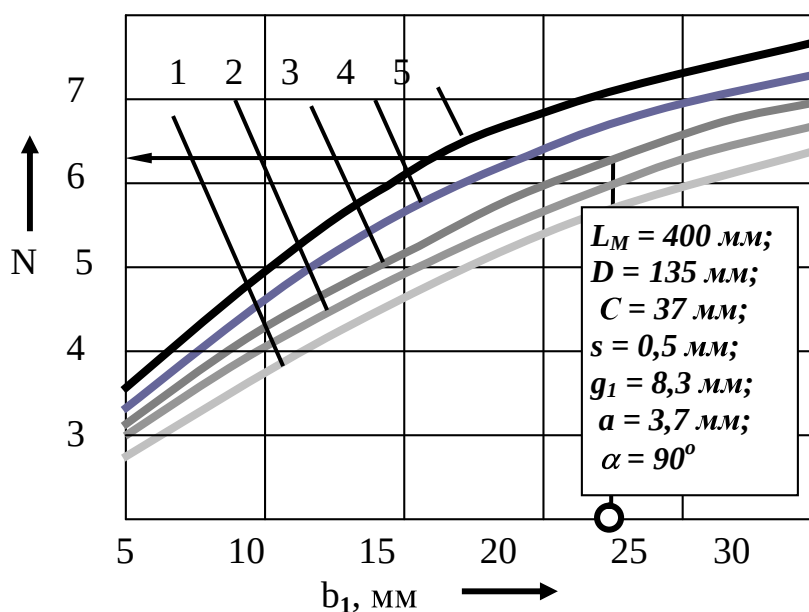


Рис. 4.33. Определение числа переходов:

1 – 5 – $r_B = 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0 \text{ мм}$ соответственно

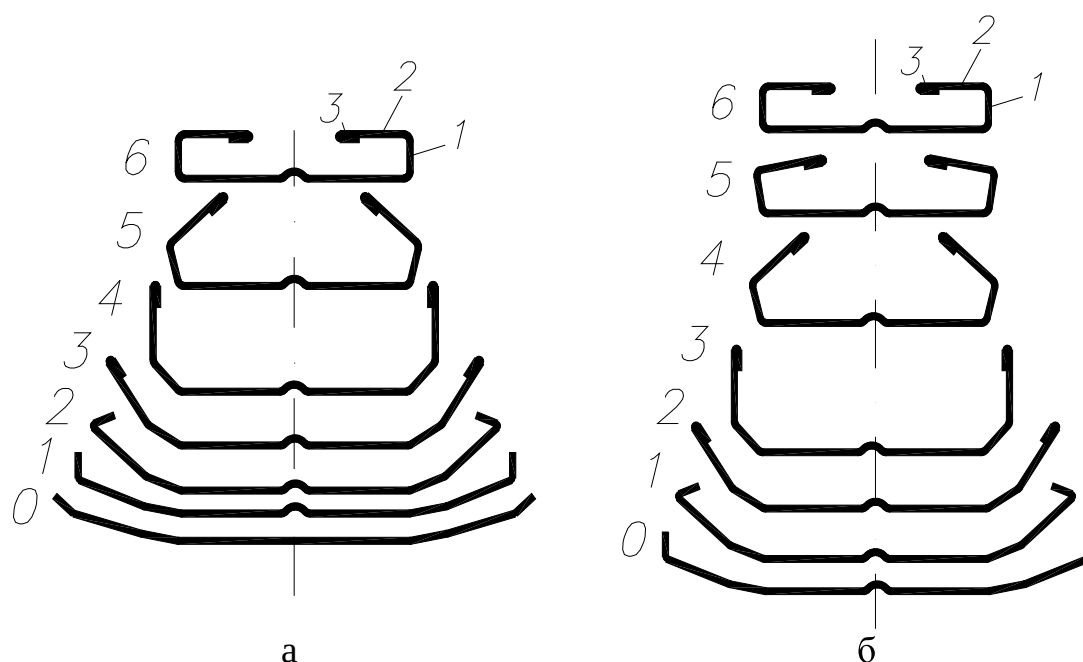
В предварительной схеме формообразования (рис. 4.34а) периферийные элементы подгибают в первых четырех переходах (включая нулевую пару роликов подающей клетки) по схеме $40^\circ - 90^\circ - 160^\circ - 235^\circ$ с максимальным углом подгибки за переход 75° ; рифт формируют во втором переходе. С целью снижения затрат на отработку технологии использовали заготовки без покрытия. При профилировании горизонтальные полки имели кромковую волнистость по выходу из калибра последнего перехода с режимом подгибки со 140° до 180° .

Таблица 4.6

Углы подгибки элементов профиля по переходам

Элемент профиля	Углы подгибки элементов профиля в градусах						
	Переход						
	0	1	2	3	4	5	6
Предварительная схема формообразования							
1	10	10	20	30	45	75	90
2	15	20	40	55	90	140	180
3	40	90	160	235	270	320	360
Окончательная схема формообразования							
1	10	20	30	45	75	80	90
2	20	40	55	90	140	175	180
3	90	160	235	270	320	350	360

В этой связи исходная схема формообразования была подвергнута пересмотру: нулевая пара была исключена, а перед окончательным переходом была введена дополнительно пара, «смягчающая» режим подгибки горизонтальной



полки (рис. 4.34б, см. также табл. 4.6).

Рис. 4.32. Схемы формообразования профиля: а – предварительная; б – окончательная

Для установления оптимального угла наклона горизонтальной полки в предчистовом переходе проводили экспериментальные исследования с постепенным изменением угла наклона образующей конуса ролика с шагом в 2 градуса и последующей формовкой заготовки.

Результаты исследования приведены на рис. 4.35, где по оси ординат указана амплитуда волны кромки; экспериментальные точки получены осред-

нением пяти замеров амплитуды волны. Отсюда видно, то оптимальным можно принять угол в диапазоне 5 – 7 градусов.

Этому обстоятельству можно дать следующее объяснение: при большом угле подгибки в области калибра заготовка и ее периферийные участки пребывают в пластическом состоянии. Контакт ролика с периферийным участком заготовки вызывает его продольное удлинение ввиду различия скорости движения заготовки и линейной скорости поверхности ролика (фактически, наличия «торможения»).

При этом величину продольной деформации кромки $\epsilon_{\text{кв}}$ рассчитывают по формуле [154]:

$$\epsilon_{\text{кв}} = \ln\left(\frac{J}{a}\right) \cdot 100 \%, \quad (4.11)$$

где a – период волны; J – длина синусоиды на ее периоде.

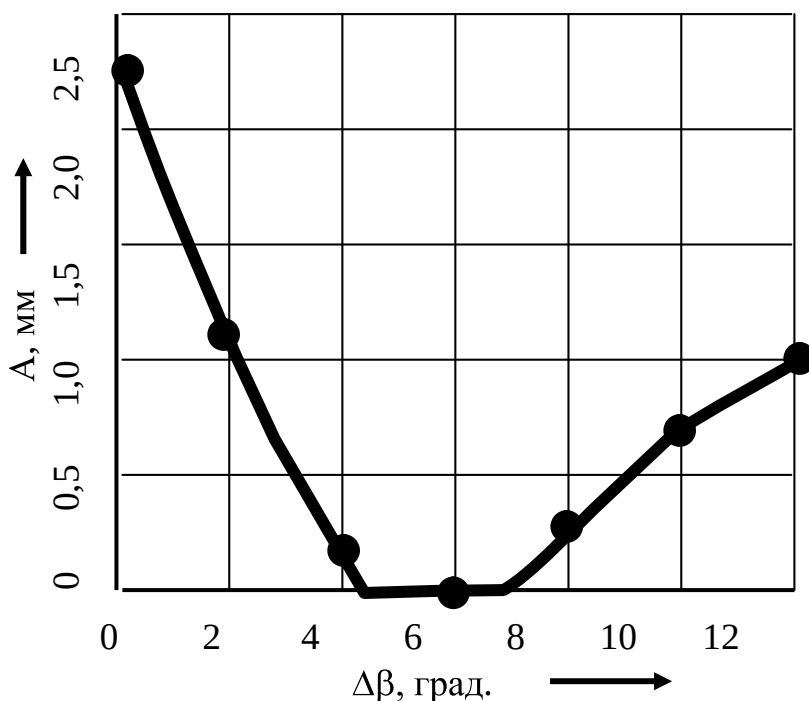


Рис. 4.35. Зависимость кромковой волнистости от угла наклона образующей конического участка ролика

Длина синусоиды определяется в соответствии с зависимостью:

$$J = \frac{2 \cdot a}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot A}{a}\right)^2} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, p\right), \quad (4.12)$$

где $E(\pi/2, p)$ – эллиптический интеграл второго рода при $0 < p^2 < 1$.

В формуле (4.12) параметр p определяется соотношением:

$$p = \sqrt{\frac{2 \cdot A^2 \cdot \pi^2}{a^2 + 2 \cdot A^2 \cdot \pi^2}}.$$

Некомпенсированная деформация (приращение длины) периферийного участка приводит к возникновению кромковой волнистости по выходу профиля из калибра. При малой степени «догибки» происходит лишь изменение угла подгибки, а пластическое состояние характерно только для угловой зоны, но не для всей подгибаемой полки. Генеалогия кромковой волнистости и соответствующие расчеты потери устойчивости элементов профиля приведены в работе [154]. Выбор углов подгибки при проектировании технологической оснастки следует производить с учетом плавности траекторий движения точек заготовки, а также с учетом критериев потери устойчивости элементов профиля.

Измененная схем формообразования (рис. 4.34б, см. также табл. 4.6) позволила получить профиль без кромковой волнистости его горизонтальных полок. Профилирование заготовки с покрытием выявило нарушение последнего с наружной стороны зоны сгиба у основания элемента двойной толщины, что связано с практически нулевым радиусомгиба, а также наличием контакта зоны сгиба с инструментом. На внутренней грунтованной поверхности заготовки наблюдались микроскладки, хотя толщина покрытия не превышает 10 мкм. Угол подгибки (180°) периферийного элемента определяет в силу формулы Е. А. Попова внутренний относительный радиус [135]:

$$\frac{r_B}{s} = 0,5 \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \Rightarrow r_B \rightarrow 0.$$

В то же время минимально допустимый радиусгиба для материала подложки из стали 08кп составляет величину порядка 0,2 мм [134]. С другой стороны, покрытие заготовки (акрилсиликоновая эмаль АС-1171) по данным, например, ООО «Лакокраспокрытие» допускает изгиб заготовки на радиус, соизмеримый с толщиной подложки. В этой связи с заказчиком было согласовано выполнение бульбообразного утолщения основания элемента двойной толщины с радиусом 0,2 мм, поскольку данное преобразование конструкции профиля не вступает в противоречие с его функциональным назначением.

Для предотвращения контакта зоны сгиба элемента двойной толщины с буртом формирующего ролика на первых переходах применяли калибры с дополнительными коническими участками (рис. 4.36в). Другие схемы замыкания калибров имеют определенные недостатки. Так, при вертикальном положении линии разъема калибра (рис. 4.36а) зона сгиба контактирует с боковой посадочной поверхностью нижнего ролика, а при горизонтальном ее положении (рис. 4.36б) происходит «закусывание» профиля в месте посадки.

На пятом и шестом переходах предусмотрены участки «высвобождения» (рис. 4.37а и 4.37б). При отработке технологии аналогичных профилей из-за наличия участков высвобождения иногда наблюдалось фланирование заготовки. В таком случае на верхнем ролике выполняют технологические уклоны (рис. 4.37в), которые также дают положительный эффект, хотя в этом случае

контакт заготовки и инструмента имеет место. Разумеется, поверхность уклонов должна быть не ниже 8 класса чистоты.

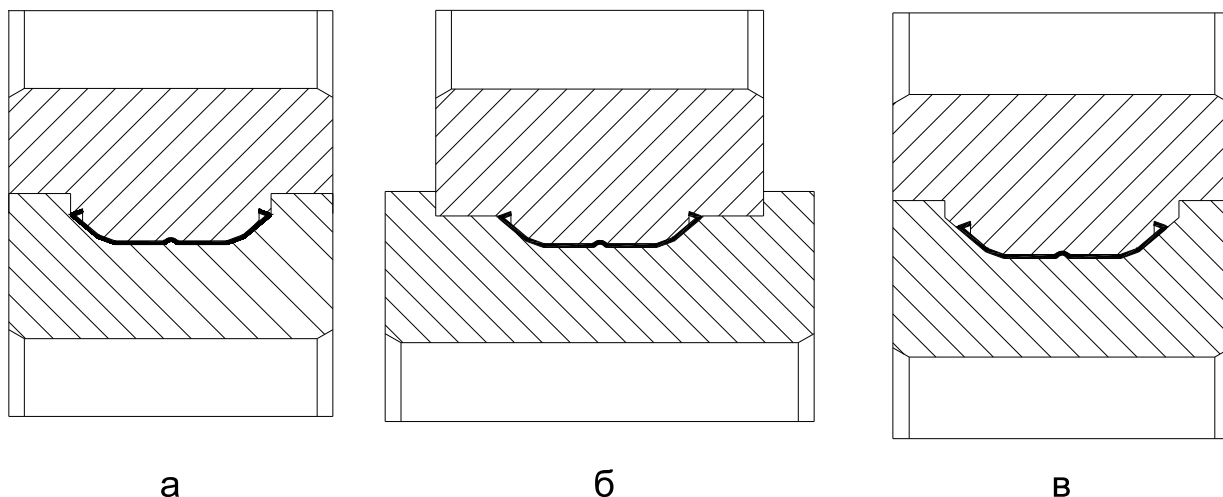


Рис. 4.36. Калибры формирующих роликов: а – с вертикальной линией разреза; б – с горизонтальной линией разреза; в – с дополнительными коническими участками

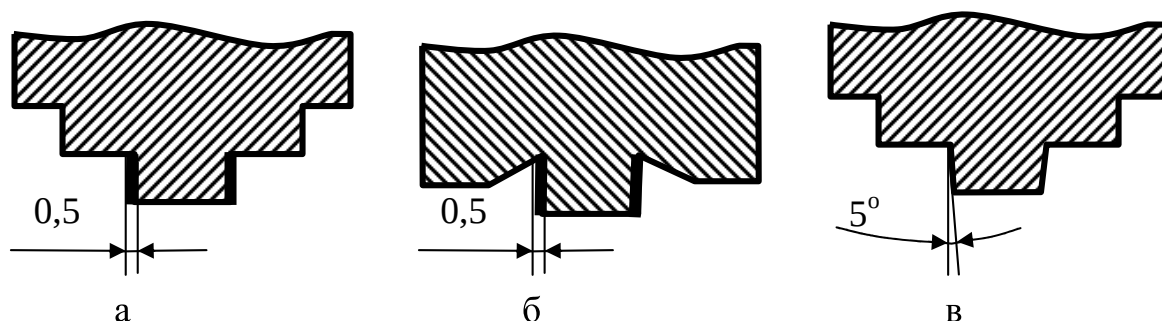


Рис. 4.37. Способы снижения касательных контактных напряжений: а, б – созданием зон «высвобождения»; в – выполнением уклонов

При проектировании оснастки линию равенства скоростей верхнего и нижнего формирующих роликов следует располагать как можно ближе к элементу двойной толщины, однако, это пожелание является конкурирующим по отношению к обеспечению условия предотвращения кромковой волнистости. В процессах многопереходной гибки, в отличие от практикуемого нами метода интенсивного деформирования, уменьшение эффекта скольжения (контактных касательных напряжений) возможно за счет использования привода только нижних валов профилегбочного стана. При этом скорости профилирования не должны, как правило, превышать 30 м/мин, хотя известны случаи производства профилей несложного сечения из материала с лакокрасочным покрытием со скоростью до 48 м/мин на 20-и клетьевом стане. Требование ограничения скорости связано с высокой чувствительностью лакокрасочного покрытия к ударным воздействиям.

Переформовка профиля также является весьма нежелательным явлением с точки зрения сохранности покрытия. Для выбранной схемы формообразования (см. рис. 4.33б) данное условие соблюдается, поскольку протяженность зон плавного перехода во всех переходах (табл. 4.7) меньше межклетьевого расстояния профилегибочного станка. При проектировании оснастки и определении углов подгибки по переходам [153] во избежание переформовки следует производить оценку протяженности зон плавного перехода периферийных элементов с использованием модели работы [141].

Таблица 4.7

Протяженность зон плавного перехода (ЗПП)

Зона формо-изменения:	Протяженность ЗПП, мм							L _м , мм
	2.1 Номер перехода							
	0	1	2	3	4	5	6	400
2.2 Полного	35	95	92	205	206	115	120	
Наиболее ин-тенсивного	9	19	12	123	130	45	37	

Схема формовки в данной технологии предусматривает плавное изменение радиусовгиба по переходам между базовым элементом (дно профиля) и подгибаемыми полками (рис. 4.38) во избежание значительных контактных напряжений, характерных для схемы формовки с постоянным радиусом. Примерно такой же характер изменения радиусовгиба присущ и другим технологиям производства полузакрытых профилей иных типоразмеров из заготовок с покрытием. Профили из материалов без покрытия методом интенсивного деформирования изготавливают обычно по схеме жесткого задания радиуса на первых переходах.

Что касается рифтов, то одиночные мелкие рифты (высотой, соизмеримой с толщиной заготовки) при интенсивном деформировании могут также выполняться на первых переходах, в то время как исполнение глубоких и множественных рифтов следует распределять по переходам. Формовка рифтов приводит к боковой утяжке материала и резкому изменению жесткости элементов профиля, что существенно влияет на режимы профилирования, в частности, режим подгибки элементов профиля.

При изготовлении профилей с покрытием желательно применение смазок, например, хлопкового масла. Однако данное требование для профилей с толщиной стенки менее 1 мм не является настоящим ввиду малости контактных напряжений.

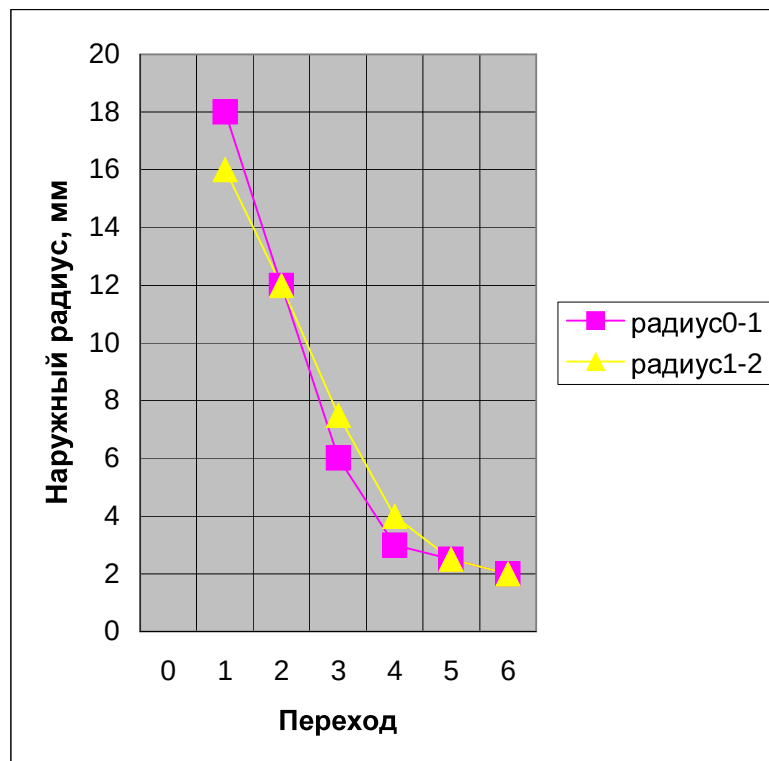


Рис. 4.38. Изменение наружного радиуса заготовки между элементами профиля

По результатам разработки можно дать следующие рекомендации:

1. При разработке технологии производства полузакрытых профилей с элементами жесткости из заготовок с покрытием можно использовать модель определения числа переходов для С-образных профилей, учитывающую степень «стеснения», жесткость угловой зоны и форму дна профиля.

2. В схемах формообразования следует предусматривать для предчистового перехода расположение будущей горизонтальной подгибаемой полки с наклоном в $5 - 6^\circ$ к горизонтали.

3. Углы подгибки элементов следует назначать с учетом плавности траекторий движения точек заготовки и критериев потери устойчивости элементов профиля.

4. Предотвращение нарушений покрытия может быть обеспечено схемой замыкания роликового калибра по образующей конического участка ролика, а также выполнением участков «высвобождения» или технологических уклонов.

5. При разработке технологии надлежит избегать возможной переформовки профиля на основе расчета протяженности зоны плавного перехода и оптимизации режимов подгибки элементов профиля.

6. Схему формовки с переменным радиусом кривизны зон сгиба следует предпочитать схеме формовки с фиксированным радиусом кривизны.

4.16. Пример разработки технологии производства бамперов автомобиля ВАЗ – 2108, реализованной на автоматизированной линии

В практике автомобилестроения последних лет сохраняется устойчивая тенденция к частой смене объектов производства в связи с модификацией и постановкой на производство новых видов автомобилей. При этом растет и удельная доля деталей, получаемых методами профилирования (традиционным профилированием, стесненным изгибом или методом интенсивного деформирования [188], позволяющими производить кузовные детали, трубчатые детали различного назначения, силовые и декоративные элементы оснащения и отделки салона, также стеклоподъемники [21] и бамперы – профильные детали с продольной кривизной.

В связи с относительно частой сменой объекта производства (автомобиля) и необходимостью придания продольной кривизны некоторым деталям, например, бамперам, преимущество следует отдавать технологии интенсивного деформирования или стесненного изгиба в связи с применением компактного и дешевого оборудования достаточно высокой производительности и небольшим количеством малогабаритного технологического оснащения [188].

Рассмотрим особенности создания технологии и технологического оборудования в интересах автомобильной промышленности на примере производства бамперов автомобиля ВАЗ – 2108.

Заказчиком технологии и оборудования представлен чертеж профиля, приведенный на рис. 4.39, а также техническое задание на создание линии, основным требованием которого являлось выполнение пробивки крепежных отверстий и гибки по контуру в едином технологическом цикле при скорости профилирования не менее 4 м/мин.

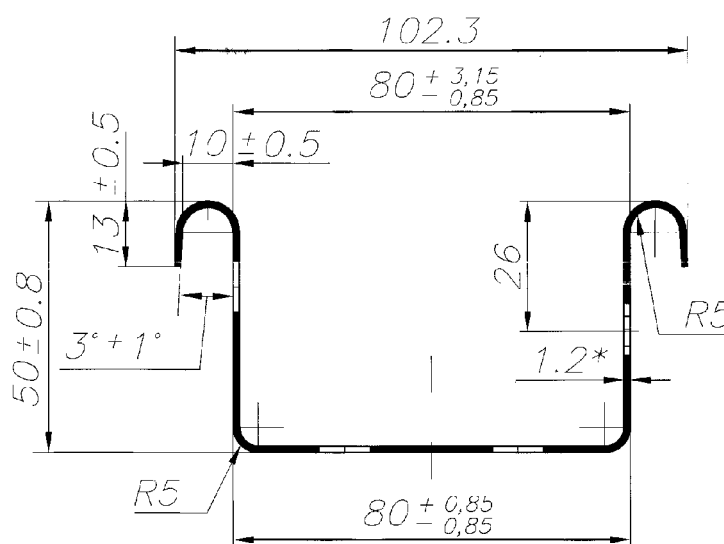


Рис. 4.39. Чертеж детали «бампер»

При разработке технологии изготовления бампера подлежали решению следующие задачи:

1. Определение последовательности операций формообразования сечения, отрезки, гибки по контуру и пробивки;
2. Расчет основных параметров процесса для решения вопроса определения состава и вида оборудования, проектирования нестандартного оборудования и технологического оснащения;
3. Проектирование и изготовление вспомогательных компонентов линии, отладка и внедрение технологии.

Анализ вариантов возможной последовательности операций показал, что пробивку отверстий целесообразно осуществлять перед процессом профилирования, поскольку выполнение отверстий непосредственно после формообразования не позволяет управлять очагом пластической деформации последней клетки гибочно-прокатного станка для придания профилю продольной кривизны, и следовательно, потребовался бы дополнительный агрегат для ее формирования. Пробивка отверстий на профиле мерной длины существенно повышает трудоемкость, стоимость и требует дополнительного рабочего места для распараллеливания технологического процесса. Включение в линию устройства для отрезки профиля с продольной кривизной позволило бы обеспечить полную автоматизацию линии. Таким образом, была определена следующая последовательность операций: пробивка отверстий, формообразование сечения и совмещенное с ним формирование продольной кривизны, отрезка.

Для выбора формующего оборудования производили расчет ширины заготовки и числа переходов. Ширину заготовки B_3 вычисляли по средней линии сечения профиля (см. рис. 4.37а) в соответствии с формулой:

$$B_3 = \sum_{i=1}^5 l_i + \sum_{k=1}^4 r_k \cdot \alpha_k, \quad (4.13)$$

где l_i – длина i -го прямолинейного участка; r_k , α_k – радиус кривизны и внутренний угол k -го криволинейного участка соответственно.

Расчет по формуле (4.13) дает: $B_3 = 209,4$ мм.

Число переходов определяли на основе полуэмпирической модели [191]:

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos \alpha)}{L_M \cdot n} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_b \cdot s}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \Psi. \quad (4.14)$$

где F – функция формы; L_M – межклетьеовое расстояние профилегибочного станка, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм; α – суммарный угол подгибки боковых полок, град; C – ширина дна профиля, мм; R – средний радиусгиба, соответствующий 95% уровню охвата зоны сгиба пластическими деформациями, мм; r_b – внутренний радиус зоны сгиба, мм; s – толщина заготовки, мм; n – число зон сгиба профиля; Ψ – фактор соотношения номинального и принимаемого для проектирования диаметра формующего ролика.

В формуле (4.14) первый сомножитель в квадратных скобках отражает влияние формы дна заготовки профиля, второй – степень «стеснения» заготовки, третий – жесткость угловой зоны. Функция формы F для корытного профиля определяется соотношением:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{C + b \cdot \cos \alpha}{C + b \cdot \cos \alpha + g}, \quad (4.15)$$

где g – ширина горизонтальных полок профиля.

В формуле (4.15) коэффициент 3,2 получен калибровкой формулы (4.14) на массиве экспериментальных данных при сквозной прогонке модели по ширине полки.

Формула (4.14) разработана для профилей с гладкими горизонтальными полками, в связи с чем в расчетах, относящихся к профилю с полукруглыми горизонтальными полками (см. рис. 4.37), введены следующие процедуры предварительного определения параметров и условий:

1. Функцию формы определяли как для корытного профиля с гладкими горизонтальными полками шириной, равной ширине их развертки;
2. Число зон сгиба принимали равным четырем;
3. Межклетьевое расстояние принимали равным 400 мм – типовым для станков семейства ГПС;
4. Фактор $\Psi = 1,056$.

Выбор числа переходов в зависимости от параметров сечения профиля ($C = 80$ мм, $b = 50$ мм, $g_1 = 24$ мм, $b_1 = g_1 + b = 74$ мм, $R = 12$ мм) производили по рис. 4.40, выполненному с помощью прикладной программы MathCAD – 2001 Pro. В соответствии с п. 1 и 2 условий, приведенных выше, в расчетах были приняты модифицированные значения ширины горизонтальной и подгибаемой полок g_1 и b_1 соответственно.

Окончательно число переходов с учетом полученного из рис. 2 значения 5,26 определяется формулой, в которой функция Integer выделяет целую часть числа:

$$N = \text{Integer}(5,26) + 1 = 6.$$

По высоте профиля, ширине развертки заготовки и числу переходов в качестве основного формообразующего оборудования был определен станок СП2-200х6, имеющий характеристики, приведенные в табл. 4.8.

Схема формообразования профиля была определена следующим образом: базовый элемент – дно профиля; режим формовки – с постоянным радиусом; углы подгибки – по методике работы [153]. Схема формообразования приведена на рис. 4.41

Пружинение подгибаемых полок профиля устранялось за счет «поднутрения» $\Delta\alpha$ на последнем переходе (рис. 4.42, см. также рис. 4.41), для которого подсчитывали угол пружинения в соответствии с работой [178]. Однако упругая отдача элементов профиля приводит к завышенным значениям линейных размеров, что хорошо видно из рис. 4.42, где показано, что по выходу из калиб-

ра последнего перехода ширина профиля имеет приращение ΔL на сторону. При проектировании роликовой оснастки назначали размеры калибра последней формирующей пары роликов с учетом изменения размера профиля на величину ΔL так, чтобы размер профиля соответствовал нижней границе допускаемого размера. Это позволило выдержать допуски на линейные размеры поперечного профиля, а кроме того, создан запас в пределах величины поля допуска на профиль на будущий износ роликов, что позволит существенно повысить срок их службы.

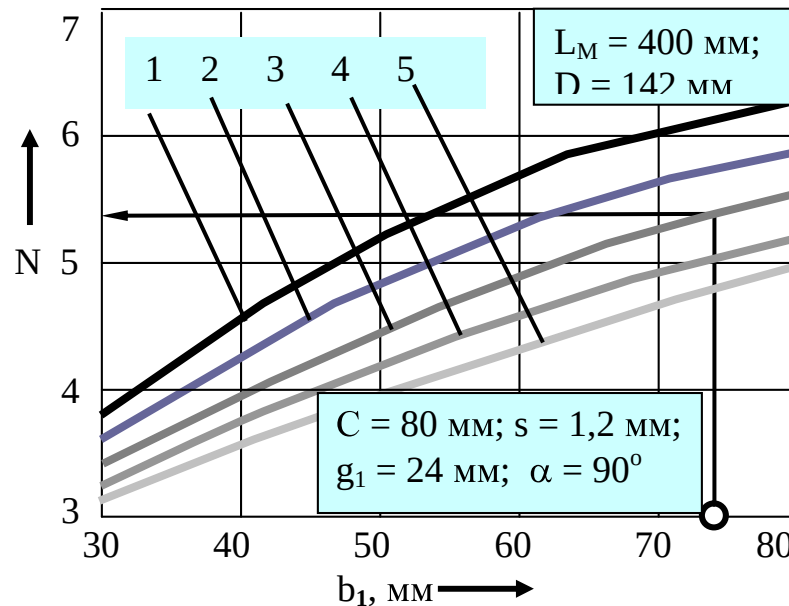


Рис. 4.40. Определение числа переходов:
1 – 5 – $g_1 = 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0$ мм соответственно

Таблица 4.8

Технические характеристики профилегибочного станка

Параметр, его размерность	Значение параметра
Наибольшая глубина профилирования, мм	50
Максимальная ширина заготовки, мм	350
Толщина обрабатываемого материала, мм	0,6...2,5
Число клеток, шт.	6
Диаметр рабочих валов клетки, мм	50
Число оборотов рабочих валов клетки, об/мин	25
Диапазон регулировок блока формирования продольной кривизны (ФПК) по вертикали, мм	± 20
Контур рабочей зоны блока ФПК, мм	150x170
Мощность привода станка, кВт	11
Масса станка, кг	4500

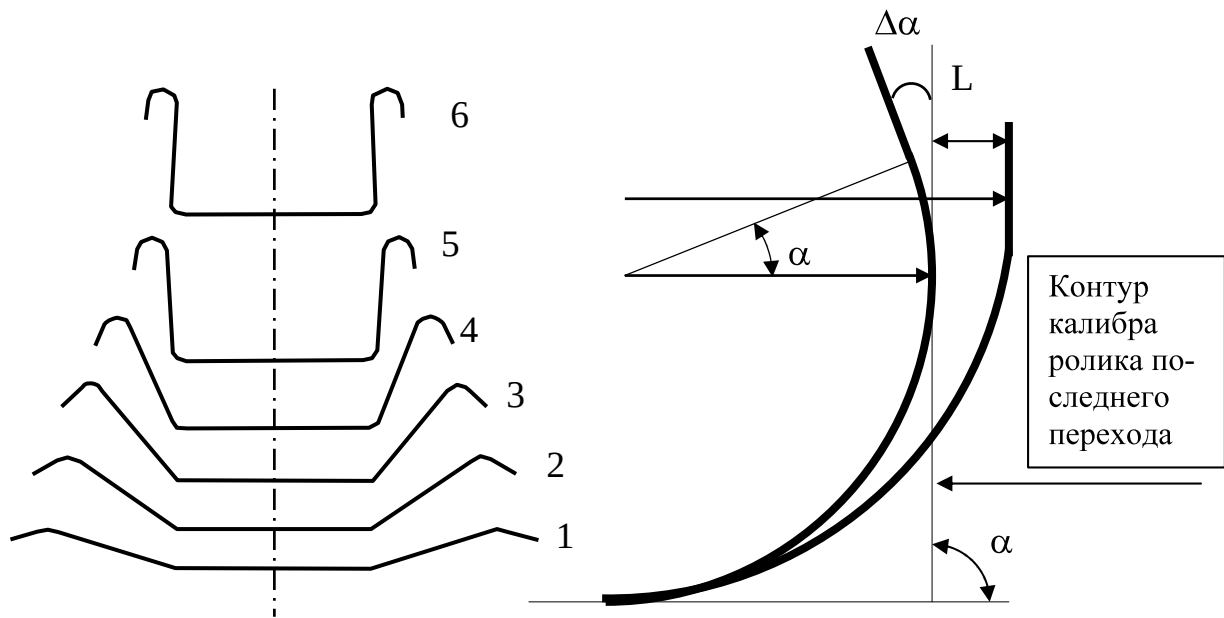


Рис. 4.41. Схема формообразования бампера Рис. 4.42. Схема упругой отдачи профиля

Величину ΔL рассчитывали по формуле [198]:

$$\Delta L = \frac{3 \cdot k \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r_B + 1/2)^2}{1 + 6 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r_B + 1/2)} \cdot s, \quad (4.16)$$

где σ_T , E – предел текучести и модуль Юнга материала соответственно;
 $k = 1,84$.

При принятии решения по совмещению формообразования сечения профиля и придания ему продольной кривизны базировались на результатах работы [189], где дано обоснование возможности управления очагом пластической деформации с помощью специального правильного устройства (здесь – блок формирования продольной кривизны), а также приведены необходимые расчетные зависимости.

Для пробивки отверстий был разработан летучий штамп (рис.4.43) с выносным приспособлением синхронизации (табл. 4.9), имеющем возможность перенастройки с переднего бампера на задний.

Штамп перфорирующий (рис. 4.43) состоит из: устройства направляющего 1, плиты нижней опорной 2, которые крепятся к столу пресса. Плита верхняя опорная 3 крепится к ползуну пресса. На опорных плитах 2 и 3 закреплены рельсы 4, по которым перемещается перфорирующий блок, состоящий из нижней 5 и верхней 6 плит, соединенных между собой колонками 7. На нижней плите установлен матрицедержатель с матрицами 9, съемник 9, склизы 10 для сбрасывания отходов от перфорации. На плите также установлены направляющие ланки 11 для ориентации ленты в поперечном направлении. На верхней плите установлен пуансонодержатель с пуансоном 12, пневмоцилиндр 13 для возврата перфорирующего блока в исходное положение. Колеса для движения

блока установлены на осях 14. К нижней подвижной плите 5 блока через кронштейн жестко крепится приспособление синхронизации. Начальное положение перфорирующего блока относительно опорной плиты 3 определяется упором 15, а конечное – датчиком, расположенным в приспособлении синхронизации.

Таблица 4.9

Технические данные штампа перфорирующего и приспособления

Параметр, его размерность	Значение параметра
Штамп	
Ход перфорирующего блока в штампе, мм	40
Ход ползуна пресса, мм	10
Рабочее давление в пневмосистеме, МПа	0,6
Габаритные размеры, мм	910x400x304
Масса, кг	430
Приспособление	
Точность позиционирования межцентрового расстояния между отверстиями, мм	$\pm 1,0$
Усилие прижима, Н	5000
Масса, кг	103

При работе, сигнал от датчика приспособления синхронизации, регистрирующего отверстие, поступает в пневмосистему пресса КД2126 и включает опускание его ползуна для пробивки отверстий. В то время, когда пуансоны находятся в теле матриц, перфорирующий блок движется вместе с лентой за счет привода гибочно-прокатного станка до момента срабатывания датчика и замыкания плит штампа. После поднятия ползуна пресса пневмоцилиндр 13 возвращает блок штампа до упора в исходное положение, а через жесткую связку с захватом – всю подвижную часть приспособления синхронизации. Аварийный концевой выключатель 16 контролирует крайнее допустимое положение блока.

Таблица 4.10

Характеристика устройства для отрезки профиля

Параметр, его размерность	Значение параметра
Ширина отрезаемой детали, мм	100
Наибольший ход пуансона, мм	80
Усилие пневмоцилиндра (при 6 атм), Н	18000
Угол наклона устройства, град	15...25
Поперечная регулировка, мм	60
Вертикальная регулировка, мм	40
Габаритные размеры, мм	830x942x1720
Масса, кг	450

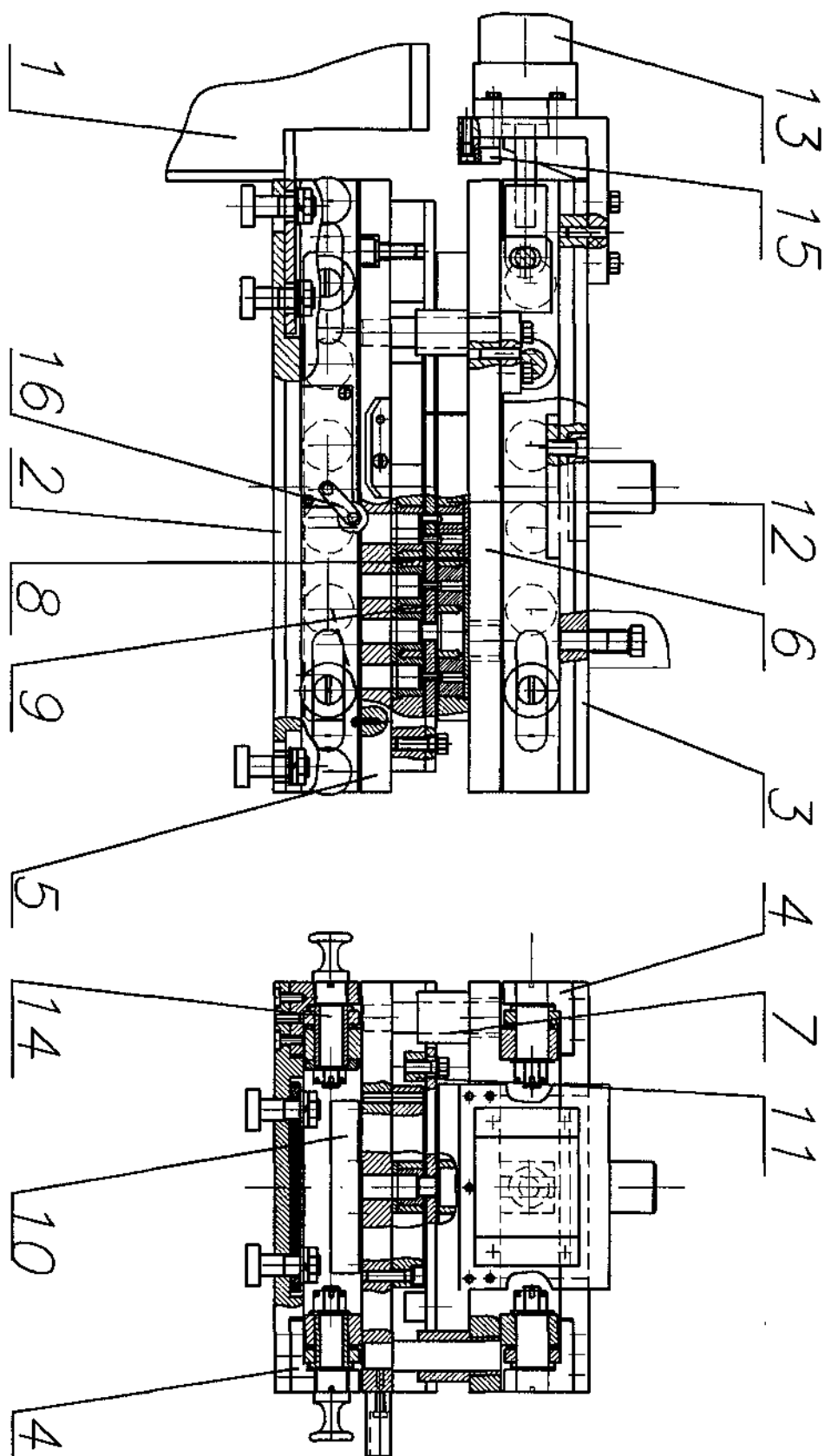


Рис. 4.43. Штамп перфорирующий

Устройство для отрезки профиля (рис. 4.43) производит отрезку профиля без останова линии. В табл. 4.10 приведены технические данные этого устройства. На рис. 4.44 дан общий вид линии для производства бамперов.



Рис. 4.44. Линия производства бамперов ВА3-21-8

Таким образом, общая компоновка линии включает следующие агрегаты: разматыватель рулона, пресс кривошипный КД2126 с перфорирующим штампом и приспособлением к нему для обеспечения точности расположения отверстий, шестиклетевой гибочно-прокатный станок СП2-200х6 для формообразования профиля с блоком формирования его продольной кривизны, устройство для отрезки профиля и приемный стол-склиз для вывода готовой детали из рабочей зоны. Технические характеристики линии и качество изготавливаемых профилей находятся в соответствии с техническим заданием и требованием чертежей бамперов. Линия находится в эксплуатации в ОАО «Кристи», г. Сызрань. Следует отметить, что стоимость созданной линии в 5 – 6 раз дешевле аналогичных линий зарубежного производства.

По результатам разработки можно сделать следующее резюме:

1. Разработка автоматизированных линий производства профильной продукции требует большого объема не только опытно-конструкторских, но и научно-исследовательских работ по созданию комплексных технологий совмещенных процессов, определенного опыта их внедрения.

2. Отечественные технологические и конструкторские разработки при уделении внимания эстетической и эргономической стороне вопроса могут

быть вполне конкурентоспособными на мировом рынке технологического оборудования для производства автомобилей и других видов транспорта.

Выводы

Выявленные основные критерии технологичности конструкции профиля (тонкостенность профиля, внутренний радиус зоны сгиба и размер отбортовки) позволяют принимать концептуальные решения – создание нового оборудования или интенсификация процесса формообразования.

Установленные требования к заготовке, расположению профиля по отношению к осям валов станка, выбору основной оси профиля позволяют оптимизировать калибровку роликовых пар с целью уменьшения вероятности потери устойчивости периферийных элементов и уменьшения поводов профиля.

Выполненный анализ систем калибровки и способов формовки позволил определить в качестве основной параллельную систему калибровки со специфическим способом формовки с постоянным радиусом зоны сгиба по переходам.

Выявлено, что расчетные углы подгибки следует проверять по двум дополнительным критериям: отсутствие кромковой волнистости, соотношениям зоны плавного перехода и межклетьевого расстояния.

Показано, что учет эффектов пружинения позволяет обеспечить размерную точность изготавливаемых профилей (линейных и угловых размеров).

Установлено, что для реализации метода интенсивного деформирования следует применять закрытый тип калибра со специфическими схемами его врезания в тело ролика. Описаны особенности проектирования инструмента и даны рекомендации по выбору материалов оснастки.

Разработанный алгоритм проектирования технологии, включающий результаты теоретических и экспериментальных исследований работы, позволяет создавать эффективные технологии производства гнутых профилей методом интенсивного деформирования.

На трех примерах разработки технологии изготовления гнутых профилей показано, что сам процесс разработки новых технологий требует значительного объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Опыт работы авторов в области профилирования показывает, что отечественные технологические и конструкторские разработки при уделении внимания эстетической и эргономической стороне вопроса могут быть вполне конкурентоспособными на мировом рынке технологического оборудования для производства широкой номенклатуры гнутых профилей для нужд различных отраслей промышленности. По сравнительным данным стоимости технологий и оборудования российские разработки в этой области могут быть примерно в 3-5 раз дешевле зарубежных.

5. ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ

Результаты проведенных авторами исследований внедрены на ряде предприятий РФ. Внедрение технологии и оборудования для изготовления профилей методом интенсивного деформирования связано с решением ряда организационных и технологических вопросов, которые рассматриваются ниже.

5.1. Технические условия на изготавливаемые профили

5.1.1. Исходные материалы

Исходным материалом для изготовления гнутых профилей является прокат тонколистой холоднокатаный и горячеоцинкованный с полимерными (органическими) покрытиями I класса, поставляемый по ТУ 14-1-4792, или без покрытия.

Виды полимерных (органических) покрытий (односторонних или двусторонних): ЛКПОЦ – лакокрасочное покрытие холоднокатаных горячеоцинкованных полосы, листа, ленты; ОЗПОЦ – органоэпоксиное покрытие холоднокатаных горячеоцинкованных полосы, листа, ленты; ПЗПОЦ – полиэфирное покрытие холоднокатаных горячеоцинкованных полосы, листа, ленты.

На лицевой поверхности полимерного (органического) покрытия допускаются отдельные царапины, не проникающие до металла, отдельные участки с искажением рельефа тиснения, отдельные участки с неоднородностью рисунка для печатных красок.

Полимерное (органическое) покрытие обратной стороны должно быть сплошным. Допускаются непрокрасы площадью не более 5%. Допускаются шагрень, штрихи, риски, включения.

К профилям из указанных выше материалов, подлежавшим изготовлению в рамках договоров с участием автора, предъявлялись общие требования нормативно-технической документации, изложенные ниже.

5.1.2. Общие требования к гнутым профилям

Гнутые профили из проката тонколистового холоднокатаного и горячеоцинкованного с полимерными (органическими) покрытиями или без покрытия изготавливают длиной от 1 до 12 м. Предельные отклонения по длине не должны превышать ± 2 мм на 1 м длины.

Предельные отклонения по толщине профилей должны соответствовать предельным отклонениям по толщине заготовки нормальной точности прокатки по ГОСТ 19904 без учета толщины покрытия. Предельные отклонения не распространяются на отклонения по толщине профиля в местах изгиба. Размерные и другие параметры должны соответствовать чертежу готового профиля и табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры профиля

Наименование параметра	Единица измерения
Площадь сечения	мм ²
Масса 1 м ²	кг
Масса 1 м	кг
Момент сопротивления	мм ³
Развертка	мм
Координаты центра тяжести	мм
Осевые моменты инерции	мм ⁴
Центробежный момент инерции	мм ⁴
Радиус инерции	мм
Главные моменты инерции	мм ⁴

Примечание: При вычислении массы профиля, согласно табл. 5.1, плотность стали принимают равной $7,85 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, массу цинкового покрытия, нанесённого на 1 м² с двух сторон листа, берут равной 0,414 кг. Массу полимерного покрытия не учитывают. Радиусы кривизны, ширина, высота полок обеспечиваются формирующим инструментом.

Общие требования, предъявляемые к качеству гнутых профилей [62]:

- поперечное сечение профиля должно соответствовать чертежу профиля и предъявляемым к нему требованиям;
- серповидность профилей не должна превышать 1 мм на 1 метр длины, общая серповидность не должна превышать произведения допускаемой серповидности на 1 метр на длину профиля в метрах;
- продольный прогиб профилей не должен превышать 1 мм на 1 метр длины, общий продольный прогиб не должен превышать произведения допускаемого прогиба на 1 м на длину профиля в метрах;
- скручивание профиля вокруг продольной оси не должно превышать произведения 1° на длину профиля в метрах, но не более 10° ;
- волнистость кромки не должна превышать 1 мм;
- на поверхности профиля не допускаются вмятины, забоины, задиры, царапины, отслоение покрытия;
- трещины на торцах и по длине профиля не допускаются;
- профили должны быть обрезаны под прямым углом. Отклонения от перпендикулярности реза к оси профиля не должно выводить профиль за номинальные размеры по длине.

5.1.3. Методы контроля

Марка и свойства исходного материала должны быть удостоверены документом о качестве предприятия-изготовителя.

Качество поверхностей профилей определяется визуально, без применения увеличительных приборов.

Контроль линейных размеров профилей, серповидность и продольный прогиб производят измерительным инструментом: рулеткой по ГОСТ 7502, металлической линейкой по ГОСТ 427, штангенрейсмасом по ГОСТ 164, штангенциркулем по ГОСТ 166. Допускается замена указанных измерительных инструментов другими, аналогичными по назначению, классом точности не ниже, предусмотренных указанными стандартами. Качество резки проверяют внешним осмотром.

5.2. Выбор основного оборудования

С использованием результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований по получению гнутых тонкостенных профилей при формообразовании их методом интенсивного деформирования, были произведены расчеты числа переходов и межклетьевого расстояния (см. формулы (2.20) и (2.55)) для выбора оборудования под номенклатуру профилей для каждого из заказчиков. По расчетным параметрам был признан подходящим гибочно-прокатный станок ГПС-350М6 (рис. 5.1).

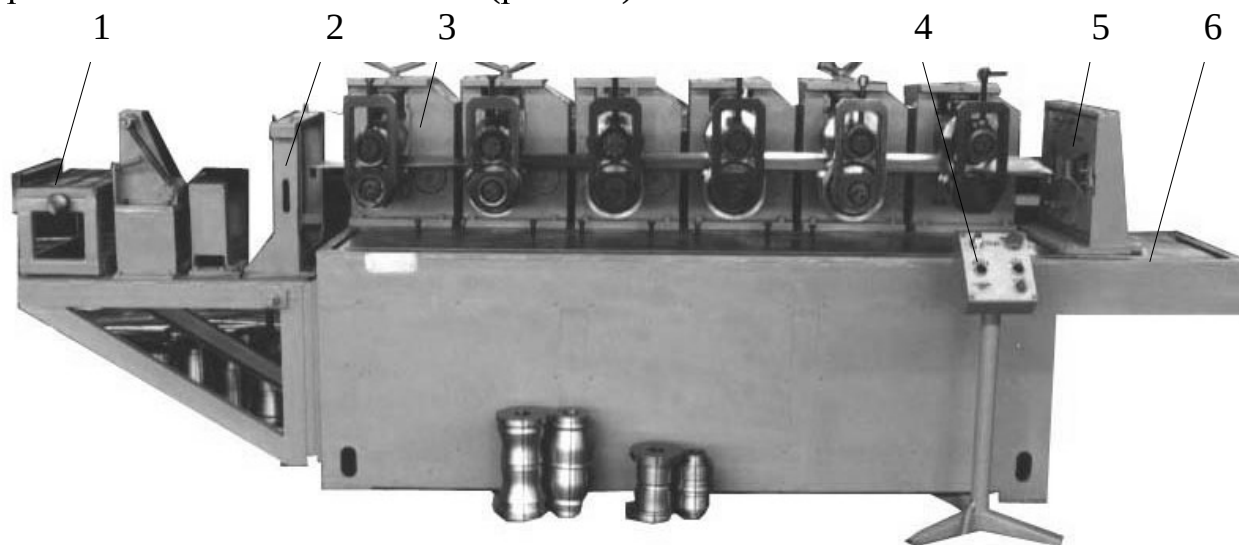


Рис. 5.1. Станок ГПС-350М6: 1 – направляющее устройство, 2 – клеть предварительного формообразования, 3 – профилирующие клетки, 4 – пульт управления, 5 – устройство для правки профиля, 6 – станина

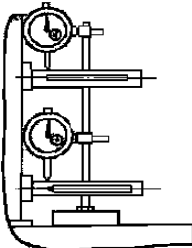
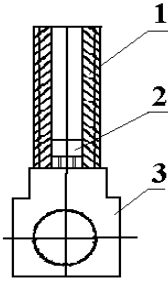
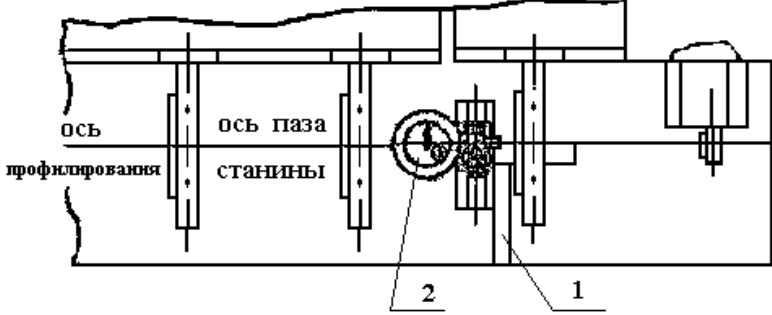
По разработанной конструкторской документации на оборудование станки были изготовлены на Ульяновском механическом заводе, внедрены и эксплуатируются на заводах ЗАО "Промышленная группа ИНСИ", ООО ЛФ "АРС Профнастил" и других предприятиях РФ.

5.3. Приемочные испытания и совершенствование конструкции оборудования

После изготовления станков ГПС-350М6, они подвергались приемочным испытаниям с участием автора на основании требований КД. В процессе испытаний проводились дополнительные наладочные и регулировочные работы. Проверки и испытания выполняли по методике, приведенной в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Таблица проверок

№№ проверок, что проверяется	Метод кон- троля	Резуль- тат проверки	Приме- чание
1	2	3	4
1. Комплектность 2. Маркировка	Внешний осмотр Внешний осмотр	Соответствует Соответствует	
 Рис. 5.2  Рис. 5.3			
3. Испытание по нормам точности и жесткости 3.1. Допуск параллельности осей рабочих валов клетки профилирующей	Рис.5.2, натяг наконечника индикатора - 1 мм.	0.2 мм на длине 200 мм	При отклонении - освободить винт 1 (рис.5.3), опустить ползун 3 и повернуть на пол оборота ходовой винт 2.
 Рис. 5.4			

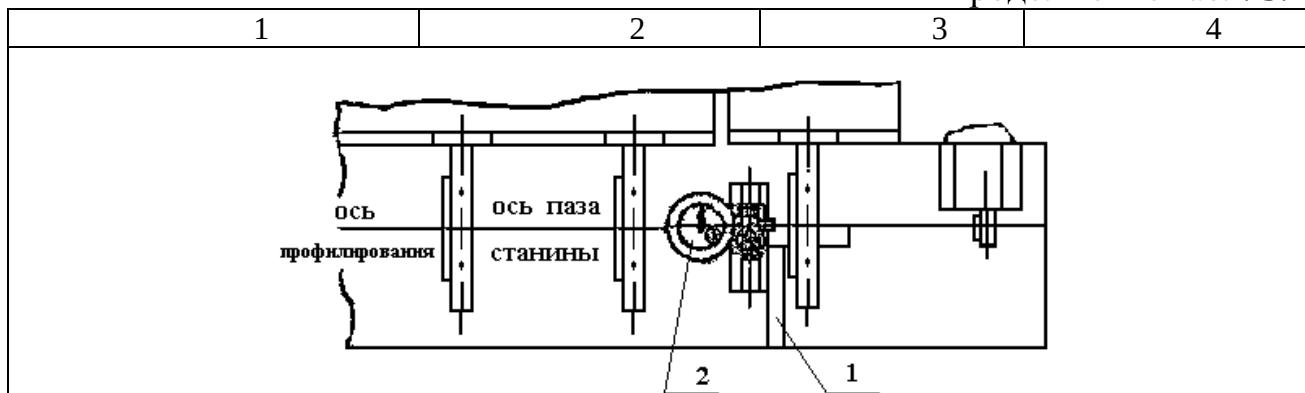
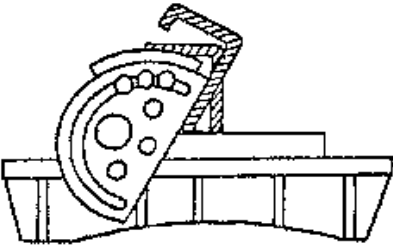
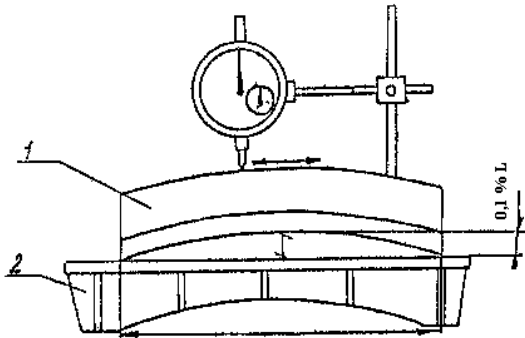


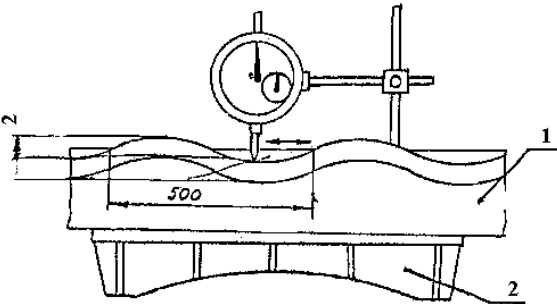
Рис. 5.4

3.2. Допуск перпендикулярности осей рабочих валов к оси профилирования.	Рис. 5.4. К натянутой параллельно оси профиля струне (± 0.05) прикладывают угольник 1 (УЛП), при совмещении длинного основания со стойкой 2. Натяг наконечника индикатора - 1 мм при касании боковой образующей вала.	0.5 мм на длине 200 мм для клетки.	При выходе валов за допуск, ослабить болты крепления клетки к станине и выровнять клеть.
Примечание: Ось профилирования параллельна оси паза на станине.			
5. Требования к конструкции	Внешний осмотр	Соответствует	
6. Требования к ответственным деталям и сборочным единицам	Внешний осмотр	Соответствует	
7. Скорость рабочих перемещений исполнительных органов	Перемещать исполнительные органы из крайнего положения с хронометрированием. Перемещения определить штангенрейсмасом.	Соответствует	
Испытания на холостом ходу			
Испытания в рабочем режиме			
8. Действие аварийного выключателя	Многократным нажатием на аварийный выключатель «Стоп» убедиться в надежности его срабатывания.	Визуально убедиться, что электродвигатель станка отключается автоматически.	
9. Требования к надежности	Непрерывная работа в течение двух смен.	8 часов	

Продолжение табл. 5.2

1	2	3	4
10. Проверка отклонений профиля 10.1. По высоте 10.2. По ширине 10.3. Предельные отклонения по толщине профиля должны соответствовать предельным отклонениям толщины поставляемого листа	Проверить штангенциркулем. Предельные отклонения по толщине профилей не распространяются на места изгиба.	Соответствует чертежу Соответствует ГОСТ 21631-76	Проводить формообразование согласно «Технологической карте». При проверке профиля концевые эффекты ≈ 300 мм с каждого конца не учитывать.
 Рис. 5.5			
10.4. Скручивание профилей вокруг оси	Один конец профиля (рис. 5.5.) уложить на плиту, на втором проверить скрутку при помощи угломера	1 град/м, общее скручивание не более 10° по всей длине детали	При отклонениях повернуть зубчатый сектор правильного устройства в сторону противоположную скрутки.
 Рис. 5.6			
10.5. Кривизна профиля в двух плоскостях	Профиль 1 (рис. 5.6) уложить на плиту 2 и измерить кривизну с помощью индикаторной стойки с натягом 2 мм	Не более 0.1 % измеряемой длины	При отклонениях построить правильное устройство.

Продолжение табл. 5.2

1	2	3	4
			
Рис. 5.7			
10.6. Волнистость профиля	Профиль 1 (рис. 5.7) положить на плиту 2 и измерить волнистость полки с помощью универсальной индикаторной стойки. Индикатор настроить с натягом 3 мм.	2 мм/м	
Минимальная длина волны		500 мм	

В процессе приемочных испытаний и отладки оборудования были выявлены его недостатки и проведены мероприятия по их устранению (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Выявленные недостатки оборудования и их устранение

Вид недостатка	Мероприятие по устранению
1	2
1) Конструктивно не обеспечивается перпендикулярность планок направляющего устройства рабочим валам клетей стана.	1) Разработано устройство для точной установки направляющего устройства. 2) Проведено штифтование направляющего устройства.
3) Устройство протирки и смазки ленты не оправдывает своего функционального назначения.	Разработана и введена в эксплуатацию конструкция нового трехвалкового устройства протирки и смазки ленты.
4) Клеть предварительного формообразования с вертикальными осями не применима для изготовления профилей сложной конфигурации.	Разработана и введена в эксплуатацию конструкция клетки предварительного формообразования с горизонтальными осями, подходящая для изготовления профилей любой степени сложности.

Продолжение табл. 5.3

1	2
5) Отсутствие устройства для формообразования профиля в межклетьевом пространстве.	Разработана и введена в эксплуатацию конструкция проводящего устройства с вертикальными осями, имеющими свободу перемещения в направлении перпендикулярном и параллельном движению профиля, с возможностью установки на них вспомогательных роликов, направляющих планок, оправок заполнителей и т. п.
6) В процессе работы клеть профилигибочного стана имеет возможность смещаться и разворачиваться.	1) Разработано устройство для точной установки клеток профилигибочного стана. 2) Проведено штифтование клеток.

Предложения по совершенствованию оборудования включены в ТЗ на разработку номенклатурно-ориентированного гибочно-прокатного оборудования легкой, средней и тяжелой серии для изготовления гнутых профилей методом интенсивного деформирования.

5.4. Изготовление инструмента и освоение технологии

Изготовление основных формующих валков производили в следующей последовательности:

- 1) Резка сортового проката или поковок на заготовки (механическая ножовка, пила Геллера).
- 2) Токарная обработка отрезанных заготовок в габаритный размер ролика, сверление отверстия под вал (универсальный токарный станок типа 16K20).
- 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 16K20).
- 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 16K20, 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 контролировали согласно чертежу. При работе периодически контролировали состояние рабочей поверхности роликов и посадочных мест на предмет отсутствия трещин, рисок, царапин и следов налипания материала заготовки.

Освоение технологии изготовления гнутых тонкостенных профилей методом интенсивного деформирования производили в соответствии с технологической картой табл. 5.4.

Таблица 5.4

Технологическая карта отработки опытного профиля

№ операции	Наименование операции	Образец	Наименование инструмента
1	2	3	4
1.	Установить на валы формообразующие ролики и выставить их по оси профилирования. Свободные концы валов замкнуть серьгой.	Опытный профиль	Комплект формообразующих роликов. Станок ГПС-350М6.
2.	Выставить направляющее устройство в горизонтальном и вертикальном направлениях по оси профилирования и установить его планки на ширину заготовки.		Станок ГПС-350М6.
3.	В обойму правильного устройства вставить ролики.		Комплект правильных роликов.
4.	Взять заготовку одного из типоразмеров профиля.	Ширина заготовок: $B \pm 0.2 \text{ мм}$	Станок ГПС-350М6.
5.	Подать заготовку через направляющее устройство в ролики клетки предварительного формообразования.		

Продолжение табл. 5.4

1	2	3	4
6.	Произвести формообразование в ро- ликах профилирующих клеток.		Комплект формооб- разующих роликов. Станок ГПС-350М6. Станок ГПС-350М6.
7.	Произвести контрольные замеры.		Плита поверочная, универсальная ин- дикаторная стойка, угломер, штанген- циркуль.

Одним из авторов была спроектирована большая часть технологического оснащения, произведена его отработка, получены опытные партии профилей и осуществлено внедрение технологии и оборудования на площадях заказчика.

5.5. Характеристики профилей

5.5.1. Геометрические и угловые параметры

Оценку точности размеров изготавливаемых профилей производили прямым измерением (объем выборки – 5% от каждой партии одного наименования) с применением штангенциркуля (точность измерения 0,05 мм), угломера, радиусомера, набора щупов и лекальной линейки ($L = 1\text{ м}$). Результаты измерений приведены в табл. 5.5.

Как следует из таблицы 5.5, профили удовлетворяли требованиям Заказчика по размерам поперечного сечения. В поперечном сечении профиля отклонения от угла 90° не превышали $\pm 30'$. Выпуклость и вогнутость стенок профилей не превышала 0,01 размера профиля. Местная кривизна профилей не превышала 0,5 мм на 1 м длины профиля, при этом скручивание профилей вокруг продольной оси не наблюдалось.

5.5.2. Поверхность и коррозионные свойства

Исследования поверхностного слоя на изготовленных профилях показали, что нарушений (типа задигов, царапин, трещин, отслоений, зажимов, заусенцев и т. п.) не обнаружено. В отдельных случаях (при изготовлении С – образных профилей) наблюдается небольшое утолщение по торцам – до 7%.

Таблица 5.5

Геометрия сечения профиля

Ширина дна С, мм	Высота полки Н, мм	Высота отбор- товки g, мм	Толщина S, мм	Отклонения от номи- нальных размеров		
				ΔC, мм	Δ Н, мм	Δ g, мм
Профили швеллерного типа						
110±2	45±1	—	0.7	−0.4	−0.1	—
			1.0	−0.3	−0.1	
145±2	45±1	—	0.7	−0.4	−0.1	—
			1.0	−0.3	−0.1	
			1.2	−0.1	−0.2	
			1.5	+0.1	−0.2	
170±2	45±1	—	0.7	−0.4	−0.1	—
			1.0	−0.3	−0.1	
			1.2	−0.1	−0.2	
			1.5	+0.1	−0.2	
195±2	45±1	—	0.7	−0.5	−0.1	—
			1.0	−0.4	−0.1	
			1.2	−0.3	−0.2	
			1.5	0	−0.2	
200±2	45±1	—	0.7	−0.5	−0.1	—
			1.0	−0.4	−0.1	
			1.2	−0.3	−0.2	
			1.5	0	−0.2	
220±2	45±1	—	0.7	−0.5	−0.1	—
			1.0	−0.4	−0.1	
			1.2	−0.3	−0.2	
			1.5	0	−0.2	
Профили С типа						
145±2	45±1	13 – 1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4
150±2	45±1	13 – 1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4
195±2	45±1	13 – 1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4
200±2	45±1	13 – 1	0.7	−0.2	−0.2	−0.2
			1.0	−0.1	−0.2	−0.3
			1.2	0	−0.1	−0.4
			1.5	+0.2	0	−0.4

Проведенные в ОАО НИИЛКП с ОМЗ "Виктория" коррозионные испытания образцов профилей по определению влияния деформации на свойства антикоррозионных покрытий, нанесенных на оцинкованный лист показали, что деформация в процессе формообразования профиля не привела к нарушению целостности ни цинкового, ни защитного покрытия.

Испытания проводились в камере соляного тумана. При изучении образцов в процессе испытаний особое внимание обращалось на состояние торцевых участков и зон сгиба.

Таблица 5.6

Результаты испытаний образцов в камере соляного тумана

Наименование материала	Цвет покрытия	48 час	96 час	120 час	260 час
Полиэстер	Красный	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	Вишневый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	Коричневый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
Пластизоль	Светло-зеленый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	Темно-зеленый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
Сталь оцинкованная	Без покрытия	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм

Как видно из табл. 5.6, после 260 часов испытаний все покрытия остались без изменений, а на оцинкованных образцах выхода продуктов коррозии основного металла на поверхность не наблюдалось.

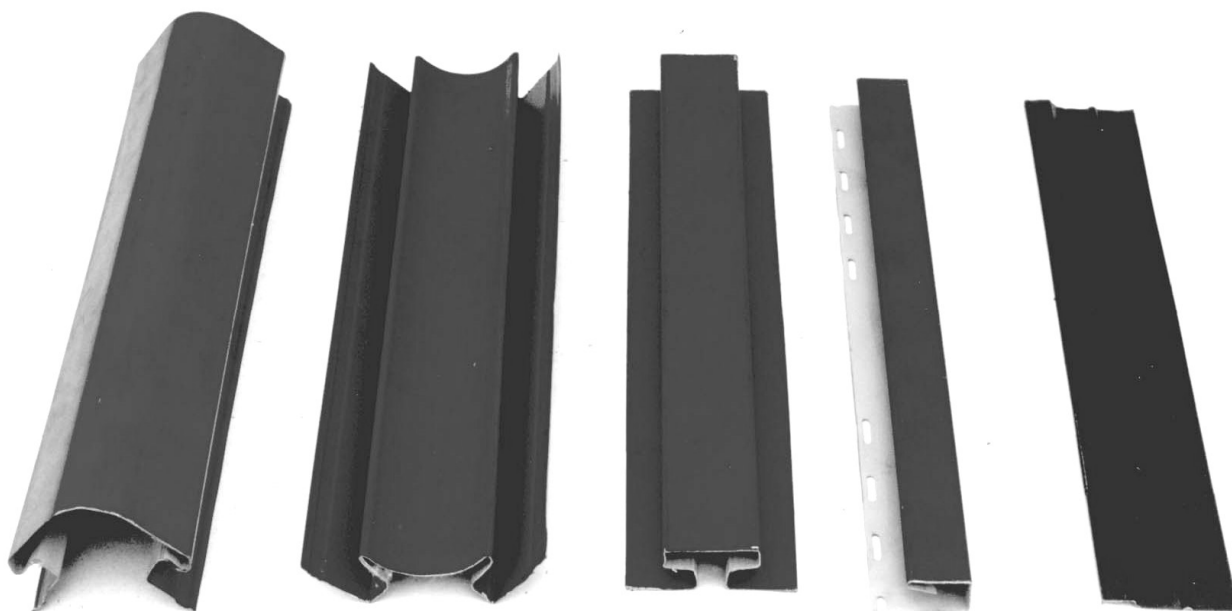


Рис. 5.8. Типы профилей, изготовленных методом интенсивного деформирования

5.6. Внедрение технологии на площадях заказчика

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать технологию для производства гнутых перфорированных профилей методом интенсивного деформирования, реализованную на автоматизированной линии (рис. 5.9), включающей станок ГПС-350М6.

Регламент внедрения технологии предусматривает следующую последовательность:

- 1) Сдача КД на технологическое оснащение в производство.
- 2) Проведение авторского надзора за изготовлением инструмента.
- 3) Приемочные испытания и апробирование технологического оснащения.
- 4) Отработка технологии.
- 5) Получение опытной партии профилей.
- 6) Метрологический анализ профилей и их исследования.
- 7) Внесение изменений и примечаний в КД на технологическое оснащение.
- 8) Передача технологического оснащения и документации заказчику.
- 9) Запуск технологии каждого из профилей в серийное производство.
- 10) Получение заключения ОТК и ЦЗЛ на каждый профиль.
- 11) Оформление акта о внедрении оборудования и технологии.

Объем внедрения оборудования составил две автоматизированные линии по изготовлению гнутых профилей, в том числе :

Состав линии 1:

- станок гибочно-прокатный ГПС 350М6х50;
- устройство перфорирующее пневматическое;
- устройство отрезное пневматическое;
- отсчитывающее устройство;
- электронный блок управления;
- руководство по эксплуатации автоматизированной линии.

Состав линии 2:

- станок гибочно-прокатный ГПС 350М6х50;
- устройство для перфорации профиля на базе прессы КД 2128;
- устройство для отрезки профиля на базе прессы КД2126;
- отсчитывающее устройство;
- электронный блок управления;
- руководство по эксплуатации автоматизированной линии.

Объем внедрения технологии составил 49 типоразмеров гнутых перфорированных профилей с покрытием, в том числе:

- швеллерный профиль – 27 типоразмеров;
- С-образный профиль – 16 типоразмеров;
- корытный профиль – 1 типоразмер;
- специальный профиль – 5 типоразмеров.

Основные характеристики автоматизированной линии:

Наибольшие размеры заготовки, мм	2.5 x 350
Скорость профилирования, м/мин	до 20
Наибольшая глубина профилирования, мм	50
Время переналадки, мин.	до 60
Потребляемая мощность, кВт	не более 20

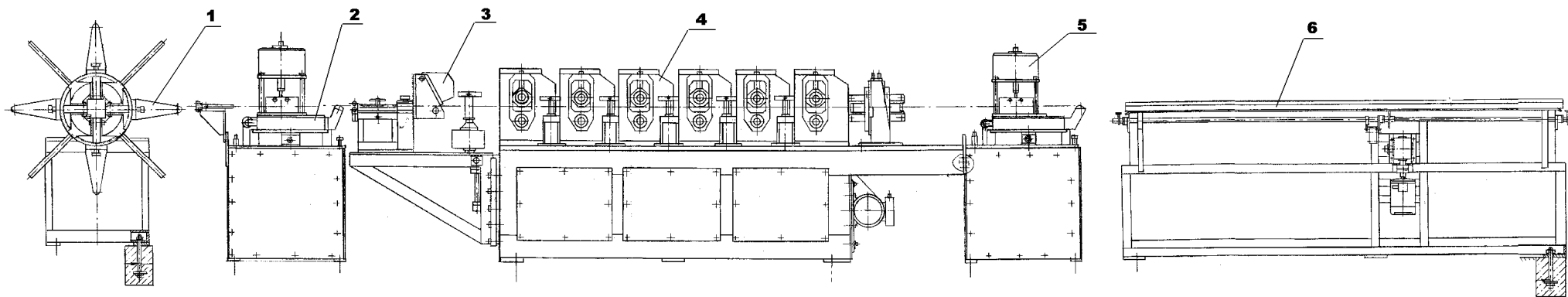


Рис. 5.9. Схема автоматизированной линии: 1 – рулонница подающая РП-350; 2 – устройство для перфорации; 3 – электронная система управления; 4 – станок гибочно-прокатный модели ГПС - 350М6х50; 5 – устройство для отрезки; 6 – стол приемный со сбрасывателем

Для получения качественного профиля с технической точки зрения было обеспечено следующее:

1) конструкция клеток гибочно-прокатного станка выполнена достаточно жесткой: изменение расстояния между валами не превышало 0.05 мм; 2) межклетьевое расстояние (расстояние между осями, соединяющими центры валов двух соседних клеток) было оптимальным, для изготовления номенклатуры профилей; 3) межцентровое расстояние рабочих валов одной клетки выполнено с возможностью регулировки в вертикальной плоскости за счет перемещений верхнего и нижнего вала, это необходимо для настройки оси профилирования в вертикальной плоскости; 4) параллельность рабочих валов каждой клетки между собой и валами остальных клеток была в пределах $\pm 0,1$ мм во избежание перекоса линии профилирования; размеры и конструкция формирующих валков обеспечивают постоянство зазоров между ними и закрытый контур роликового калибра; 5) точность изготовления формирующего инструмента обеспечивается в пределах 7 квалитета при чистоте рабочей поверхности $\nabla 0,4$.

Применение разработанного, исследованного и внедренного в производство метода интенсивного деформирования позволило обеспечить:

- формообразование гнутых тонкостенных профилей с большим количеством зон сгиба за малое количество технологических переходов формообразования;
- повышение качества профилей и ликвидацию брака от потери устойчивости периферийных элементов профиля;
- стабилизацию процесса интенсивного деформирования при гибке-прокатке;
- снижение трудоемкости изготовления профилей за счет уменьшения времени переналадки оборудования с одного типоразмера на другой;
- простоту изготовления, наладки и работы;
- возможность встраивать гибочно-прокатный станок в автоматизированные линии по изготовлению профилей.

Выводы

Проведенные расчеты межклетьевого расстояния и числа переходов с использованием разработанных моделей позволили выбрать основное технологическое оборудование – гибочно-прокатный станок ГПС350М6.

Разработанная методика испытания ГПС-350М6 позволила осуществить качественную приемку оборудования и провести мероприятия по его совершенствованию.

Рассчитанное и спроектированное на основе проведенных исследований технологическое оснащение обеспечило соответствие качества изготавливаемых профилей требованиям нормативно-технической документации.

Внедрены две автоматизированные линии по производству перфорированных профилей с покрытием.

6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ

Расчет экономической эффективности внедрения инноваций обычно рассматривают отдельно в приложении к конкретным условиям осуществления проекта. Рассмотрим обобщенный типовой случай внедрения технологии и оборудования в минимальной комплектации для производства одного типа С-образного профиля $21 \times 24 \times 4 \times 2$ мм с шириной развертки $B = 65,56$ мм. Основываясь на методике работы [190] и концепции дисконтированного дохода от реализации проекта, определим технико-экономические показатели производства.

Расчеты представлены ниже в табл. 6.1 – 6.20.

6.1. Расчет чистого дисконтированного дохода от реализации проекта

Экономический эффект ($\mathcal{E}$) от реализации проекта определяется как превышение стоимостной оценки результатов (P) над стоимостной оценкой совокупных затрат ресурсов за весь период осуществления проекта (3):

$$\mathcal{E} = P - \mathcal{Z}, \quad (6.1)$$

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (P_t - \mathcal{Z}_t), \quad (6.2)$$

где $\text{ЧДД} = \mathcal{E}_{\text{инт}}$ – интегральный эффект; T – горизонт расчета; P_t – результаты, получаемые в t – м шаге.

$$P_t = P \cdot \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (6.3)$$

где $\mathcal{Z}_t$ – затраты, достигаемые в t – м шаге.

$$\mathcal{Z}_t = \mathcal{Z} \cdot \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (6.4)$$

где P и $\mathcal{Z}$ – результаты и затраты в текущих ценах.

В формулах (6.3) и (6.4) дробный множитель отражает эффект дисконта на результаты реализации проекта. Для определения составляющих, входящих в формулу (6.1) необходимо определить ряд составляющих величин.

Капитальные затраты – стоимость основных производственных фондов (ОПФ) и оборотных средств с учетом затрат на НИОКР и остаточной стоимости заменяемого оборудования. Основные формулы и необходимые пояснения для оценки стоимости основных производственных фондов и оборотных средств сведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Капитальные затраты

Показатели	Расчетные формулы
1	2
ОПФ: 1. Стоимость оборудования	Стоимость вновь приобретенных машин, нагревательных и термических установок, транспортных средств, производственной тары. $K_{OB} = \sum_{i=1}^n C_{OBi} \cdot c_i \cdot K_{MD}, \quad (6.5)$ где $C_{об}$ – оптовая (рыночная) цена i – оборудования; c_i – число станков; K_{MD} – коэффициент, учитывающий доставку и монтаж оборудования (принимается 1,1); n – число типов станков.
2. Стоимость зданий и сооружений	$K_{зд} = \sum_{i=1}^n C_{зд} \cdot f_i \cdot c_i \cdot K_d, \quad (6.6)$ где $C_{зд}$ – цена за 1 м² производственного здания; принимается 12÷15 тыс.руб. f_i – площадь занимаемая i – м станком, м², K_d – коэффициент дополнительной площади (на проходы, проезды), принимается (2÷4).
3. Стоимость инструмента и технологичность оснастки	$K_{ин} = \sum_{i=1}^n C_{инi} \cdot N_i, \quad (6.7)$ где $C_{инi}$ – цена единицы инструмента i-го вида длительного пользования (не может быть ниже 300 руб., так как более дешевый инструмент включается в себестоимость продукции); N_i – наличие инструмента i-го вида (дублера).
4. Затраты на НИОКР	$K_{НИОКР} = C_{НИОКР} \cdot T_{НИОКР}, \quad (6.8)$ где $C_{НИОКР}$ – цена за 1 чел-день НИОКР, принимается 300÷500 руб., $T_{НИОКР}$ – трудоемкость НИОКР в чел.-днях.
<u>Итого ОПФ</u>	$K_{ОПФ} = K_{зд} + K_{об} + K_{ин} + K_{НИОКР}. \quad (6.9)$ ОПФ – многократно участвуют в производственном процессе, не изменяя своей натуральной формы, постепенно изнашиваются и переносят свою стоимость на стоимость продукции в виде амортизационных отчислений.

Продолжение табл. 6.1

1	2
Оборотные средства	$K_{OC} = (0,5 \div 0,7) K_{OPF} \quad (6.10)$ Оборотные средства участвуют в процессе производства один раз, меняют натуральную форму и полностью переносят свою стоимость на стоимость продукции. Оборотные средства подразделяют: 1. Оборотные производственные фонды: • производственные запасы (сырье, материалы, топливо), запчасти, быстроизнашивающийся инструмент; • незавершенное производство (незаконченная продукция, находящаяся на различных стадиях производства, полуфабрикаты); • расходы будущих периодов (затраты на подготовку нового изделия). 2. Фонды обращения: • готовые изделия, находящиеся на складах предприятия; • денежные средства предприятия (средства в кассе и на расчетном счете); • неоплаченная заказчиком продукция.
<u>Всего капитальные затраты</u>	$K = K_{OPF} + K_{OC} \quad (6.11)$ Включают в себя стоимость ОПФ и ОС.

Себестоимость продукции – затраты предприятия на производство и сбыт продукции. Сводная таблица формул для расчета себестоимости дана в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Себестоимость продукции

Показатели	Расчетные формулы
1	2
1. Затраты на сырье, материалы и покупные изделия	$Z_M = H_M \cdot C_M - H_O \cdot C_O, \quad (6.12)$ где H_M и H_O – норма расходов материалов и норма отходов на единицу продукции (работ) соответственно, кг. C_M и C_O – цены материала и отхода соответственно, руб/кг.
2. Затраты на топливо и энергию на технологические цели	Включает в себя расходы на сжатый воздух, электроэнергию, другие виды энергий. Годовой расход на электроэнергию: $W_{эл} = \sum N_{OB} \cdot F_{ЭФ} \cdot K_N \cdot K_B \cdot K_{ПС}, \quad (6.13)$ где $\sum N_{OB}$ – суммарная мощность электродвигателей установленных на станке, кВт, $F_{ЭФ}$ – годовой фонд времени эффективной работы станка, ч, $K_N, K_B, K_{ПС}$ – соответственно коэффициент использования мощности, времени и потерь электроэнергии в сетях.

Продолжение табл. 6.2

1	2
3. Заработная плата производственных рабочих	Включает в себя основную заработную плату, доплаты по премиальным системам, дополнительную зарплату.
4. Отчисления (налоги) во внебюджетные фонды	Отчисления в пенсионный, медицинский фонд, фонд социального страхования, фонд занятости. Общие отчисления 38,7 % от общей зарплаты производственных рабочих.
5. Расходы на подготовку и освоение производства	Включает затраты на разработку технологического процесса (составление и внедрение управляющих программ).
6. Расхода на содержание и эксплуатацию оборудования	Включает амортизацию зданий и оборудования (Z_a), затраты на ремонт (Z_p), силовую электроэнергию ($Z_{эл}$), инструмент ($Z_{ин}$), обтирочно-смазочные материалы ($Z_{см}$). $Z_{об} = \frac{Z_a + Z_p + Z_{эл} + Z_{ин} + Z_{см}}{F_{эф}} \cdot F_{эф\ i}, \quad (6.14)$ где $F_{эф\ i}$ – фонд времени работы на i-ую номенклатуру деталей; $F_{эф}$ – фонд рабочего времени. <u>Затраты на амортизацию</u> (Z_a) определяют в соответствии с нормами амортизационных отчислений, установленными в процентах от балансовой стоимости оборудования или здания. <u>Затраты на ремонт оборудования и зданий</u> (Z_p) принимаются в размере $(3 \div 5)$ % от балансовой стоимости оборудования, здания. <u>Затраты на инструмент</u> ($Z_{ин}$) определяют исходя из стойкости инструмента (t_c) и его цены ($C_{ин}$): Для штамповочной оснастки: $Z_{ин}^{шт} = C_{ин} \cdot \frac{A}{t_c \cdot n}, \quad (6.15)$ где A – количество деталей в год, n – количество деталей за один ход пресса. Для роликовой оснастки: $Z_{ин}^{рол} = C_{ин} \cdot \frac{A_m}{t_c^p}, \quad (6.16)$ где A_m – количество метров в год; t_c – стойкость инструмента в метрах. <u>Затраты на силовую электроэнергию</u> $Z_{эл} = \sum N_{об} \cdot F_{эф} \cdot K_N \cdot K_B \cdot K_{ПС} \cdot C_{эл}, \quad (6.17)$ где $\sum N_{об}$ – суммарная мощность электродвигателей установленных на станке, кВт, $F_{эф}$ – годовой фонд времени эффективной работы станка, ч, $K_N, K_B, K_{ПС}$ – соответственно коэффициент использования мощности, времени и потерь электроэнергии в сетях. $C_{эл}$ – цена электроэнергии, руб./кВтч. <u>Затраты на обтирочно-смазочные материалы</u> ($Z_{см}$) принимают в размере 15 % от затрат на электроэнергию.

Продолжение табл. 6.2

1	2
7. Цеховые и обще- заводские расходы	$Z_{ц-з} = \frac{Z_{зпо}^{np} \cdot a_{ц-з}}{100}, \quad (6.18)$ где $Z_{зпо}^{np}$ - основная зарплата основных производственных рабочих; $a_{ц-з}$ - процент цеховых и общезаводских расходов (350 %). Включают в себя аренду производственных площадей и офисов, ко- мандировочные расходы
8. Внепроизводст- венные (коммерче- ские расходы)	Принимаются в размере 3 % от полной себестоимости. Включают в себя рекламу, штрафы, пени

6.2. Расчет капитальных затрат

6.2.1. Расчет стоимости действующего оборудования

Рассчитаем стоимость основного производственного и подъемно-транспортного оборудования с учетом затрат на монтаж и транспортно-заготовительные расходы. Затраты на транспортировку и монтаж оборудования принимаются укрупнено в размере 5 % от стоимости основного оборудования и 8 % от стоимости подъемно-транспортного оборудования.

Таблица 6.3

Стоимость действующего оборудования

Наименование оборудования, тип	Принятое кол-во, шт	Затраты на единицу, тыс.руб.		Всего, тыс. руб.
		Оптовая цена	Транспортировка и монтаж	
Линия производства профилей				
<u>Основное оборудование:</u>				
1. Станок ГПС-350М6.	1	1200	60	1260
<u>Дополнительное оборудова- ние</u>				
2. Рулонница подающая РП – 350	1	150	7,5	157,5
3. Электронная система управления	1	70	3,5	73,5
4. Устройство для отрезки	1	400	20	420
5. Стол приемный со сбра- сывателем	2	50	2,5	105
<u>Подъемно-транспортное оборудование:</u>				
6. Кран-балка	1	150	12	162
Итого:				2178

6.2.2. Расчет стоимости зданий и сооружений

Стоимость промышленных зданий принимается в размере 10 тыс.руб. за 1м². Устанавливаем площадь здания, занятого проектируемым участком исходя из общей площади расположенного на участке оборудования участка.

Площадь участка рассчитывается по формуле:

$$S_{уч} = \sum S_{обор} \cdot \kappa_{д.пл}, \quad (6.19)$$

где $\sum S_{обор}$ - суммарная площадь, занятая оборудованием участка; $\kappa_{д.пл.} = 2,5$ - коэффициент дополнительной площади на проходы и проезды.

Таблица 6.4

Площадь, занимаемая оборудованием

Оборудование	Габаритные размеры м х м	Площадь оборудования, м ²
Линия производства профилей		
1. Станок ГПС-350М6	4,155х1,292	5,368
Электронная система управления	–	–
2. Рулонница подающая РП-350	1,350х1,56	2,106
3. Устройство для отрезки	0,76х1,45	1,102
4. Стол приемный со сбрасывателем	6х1,05	6,3
Всего		14,876

Стоимость здания определяется по формуле:

$$C_{зд} = S_{уч} \cdot C_{зд}, \quad (6.20)$$

где $C_{зд} = 10 \text{ т.руб}$ – цена за 1 м².

$$C_{зд} = 14,876 \cdot 10 = 148,760 (\text{т.руб})$$

6.2.3. Расчет стоимости инструмента и технологической оснастки

При профилировании используется инструмент и приспособления высокой стоимости и сроком службы не менее одного года, поэтому затраты на их приобретение включаются в капитальные затраты.

Таблица 6.5

Стоимость инструмента и технологической оснастки

Наименование операции	Начальный фонд калибров, шт.	Стоимость, тыс. руб.	
		единицы	всего
Линия производства профилей			
1. Раскрой	1	150	150
2. Профилирование	6	100	600
3. Отрезка	1	40	40
Итого:			790

6.2.4. Расчет стоимости ОПФ

В стоимость основных производственных фондов включается стоимость зданий и сооружений, оборудования, инструментов, приспособлений и инвентаря, срок службы которых не менее одного года и стоимость превышает 300 руб. за единицу.

Таблица 6.6

Стоимость ОПФ

Наименование	Сумма в тыс.руб.	Примечания
	Линия	
1. Здания и сооружения	148,76	3-5%, п.2
2. Оборудование:		
а) станочное	1260	
б) дополнительное	756	
б) подъемно-транспортное	162	
3. Инструмент и приспособления	790	3-5%, п.2
4. Инвентарь	65,34	
Итого:	3182,1	

6.2.5. Расчет капитальных затрат

Капитальные затраты складываются из стоимости ОПФ и ОС.

Таблица 6.7

Капитальные затраты

Наименование	Сумма, тыс.руб.	Примечание
	Линия производства профилей	
1. ОПФ	3182,1	
2. ОС	1591,05	50 % п.1
Капитальные затраты	4773,15	

6.3. Расчет себестоимости продукции

При расчете себестоимости продукции учитываем коэффициент использования, характеризующий время работы на расчетной операции к общему времени работы. Коэффициент зависит от производительности станка. Скорость формообразования линии 12 м/мин.

Таблица 6.8

Коэффициент использования оборудования

Наименование	Производительность, м/мин	Годовой фонд работы оборудования, ч	Коэффициент простоя	Годовая программа расчетной детали, м	Коэффициент использования
Линия	12	4015	0,85	2457180	0,85

6.3.1. Расчет затрат на материалы

Затраты на основные материалы определяются, исходя из годового расхода материалов и оптовых цен на материалы.

Расчет затрат на материалы выполняется по формуле:

$$C_M = H_M \cdot C_M - H_o \cdot C_o, \quad (6.21)$$

где H_M – годовой расход материала, т; $C_M = 4900 \text{ руб/т}$ – оптовая цена материала с учетом транспортно-заготовительных расходов; H_o – общий вес отходов за год, т; $C_o = 460 \text{ руб/т}$ – оптовая цена отходов с учетом транспортно-заготовительных расходов.

$$H_M = \sum h_M \cdot A \cdot 10^{-3} = (18,12 + 6,92 + 21) \cdot 409530 \cdot 10^{-3} = 18854,76(m)$$

где h_M – норма расхода материала на одну деталь, кг.

$$H_o = \sum h_o \cdot A \cdot 10^{-3} = (0,09 + 0,09 + 0,5) \cdot 409530 \cdot 10^{-3} = 278,48(m)$$

где $\sum h_o$ – норма отхода материала на одну деталь.

Затраты на основные материалы:

$$C_M = 18854,76 \cdot 4900 - 278,48 \cdot 460 = 92,3 \text{ млн.руб}$$

Таблица 6.9

Затраты на основные материалы

Показатели	Значения	
	2	3
1. Годовая программа	2457180 м	409530 дет.
2. Наименование материала, марка	Зсп	оцинков.
3. Годовой расход металла	18854,76 т.	
4. Норма расхода металла 1 изд	46,04 кг	
5. Годовой отход	278,48 т.	
6. Норма расхода на отход 1 изд	0,68 кг	
7. Оптовая цена материала	4900 руб/т	
8. Оптовая цена отходов	460 руб/т	
9. Стоимость годового расхода материала, тыс. руб.	92388,3	
10. Стоимость отходов, тыс. руб.	128,1	
11. Годовые затраты на материал, тыс. руб.	92260,2	
12. Материальные затраты на 1 дет., руб.	225,3	

6.3.2. Расчет затрат на электроэнергию

$$W_{эл} = \sum N_{об} \cdot F_{эф} \cdot K_N \cdot K_B \cdot K_{ПС}, \quad (6.22)$$

где $\sum N_{об}$ – суммарная мощность электродвигателей установленных на станке, кВт; $F_{эф}$ – годовой фонд времени эффективной работы станка, ч; K_N , K_B , $K_{ПС}$ – соответственно коэффициент использования мощности, времени и потерь электроэнергии в сетях.

Затраты электроэнергии на линии производства профилей:

$$W_{эл} = 20 \cdot 4015 \cdot 1,15 \cdot 0,85 \cdot 1,05 = 82417,912 \text{ кВтч}$$

6.3.3. Расчет заработной платы производственных рабочих

Численность основных производственных рабочих принимается в соответствии с расстановкой по рабочим местам.

Таблица 6.10

Расчет численность рабочих

Наименование профессии	Численность по сменам, чел			Численность по разрядам, чел			
	В 1-ю смену	Во 2-ю смену	Всего	III	IV	V	VI
Линия производства профилей							
1. Основные рабочие: Слесарь-наладчик	1	1	2			2	
2. Вспомогательные рабочие: станочник	1	1	2		2		
Всего:	2	2	4		2	2	

Таблица 6.11

Заработная плата производственных рабочих

Профессия	Количество человек	Тарифная ставка, руб/ч	Фонд рабочего времени, ч	Коэффициент премии	Сумма тыс.руб
Линия производства профилей					
1. Слесарь-наладчик	2	19,30	1830	1,3	91,8
2. Станочник	2	18,10			86,1
Всего	4				177,9

Заработная плата с учетом коэффициента использования:

$$\text{Линия: } Z_{пл} = 2 \cdot 19,3 \cdot 1830 \cdot 1,3 = 91,8 \text{ тыс.руб}$$

$$Z_{пл} = 2 \cdot 18,1 \cdot 1830 \cdot 1,3 = 86,1 \text{ тыс.руб}$$

6.3.4. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

Срок окупаемости станка установлен не более 2 лет, поэтому для возмещения капитальных затрат на оборудование берем ускоренную амортизацию.

Таблица 6.12

Затраты на амортизацию

Наименование	Линия производства профилей		
	Стоимость, тыс.руб	Норма амортизации %	Сумма тыс.руб
1. Основное оборудование	2178	12	261,36
2. Здания и сооружения	148,76	5	7,438
Всего			268,798

Таблица 6.13

Затраты на ремонт оборудования и зданий

Наименование	Линия производства профилей		
	Стоимость, тыс. руб.	Затраты, %	Сумма, тыс. руб.
1. Оборудование	2178	6	130,68
2. Здания	148,76		8,925
Всего			139,61

Таблица 6.14

Затраты на износ инструмента

Наименование операции	Стойкость до полного износа, тыс.удар.	Число дет. за 1 ход, шт.	Годовая про-грамма, тыс.шт	Время износа, лет	Цена, тыс. руб.	Износ ос-настки, тысруб.
Линия производства профилей						
1.Раскрой	10 ⁶ пог. м	-	2457,180 т.метр	0,41	150	365,85
2.Профилирование	2·10 ⁵ пог. м	-	2457,180 т.метр	0,081	600	7407,41
3.Отрезка	800	1	409,530	1,95	40	20,51
						7793,83

Таблица 6.15

Затраты на электроэнергию и обтирочно-смазочные материалы

Наименование	Линия производства профилей		
	Потребляемая эл энергия в год, кВтч	Стоимость электро-энергии, кВтч	Сумма, тыс. руб.
1.Электроэнергия	82417,912	1,05	86,5
2. ОСМ	15 % от электроэн.		12,975
Всего			99,475

Таблица 6.16

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

Наименование	Линия производства профилей		
	Стоимость, тыс. руб.	Коэффициент. ис-пользования	Сумма
1. Затраты на амортизацию	268,798	0,85	228,48
2. Затраты на ремонт оборудования	139,61	0,85	118,67
3. Затраты на износ инструмента	7793,83	0,85	6624,76
4. Затраты на электроэнергию	99,475	0,85	84,6
Всего			7056,51

Таблица 6.17

Расчет цеховых и общезаводских расходов

Наименование	Линия производства профилей		
	Зарплата, тыс.руб	Процент, %	Сумма
1.Цеховые и общезаводские расходы	177,9	200	355,8

Таблица 6.18

Себестоимость продукции

Статьи расходов	Линия производст- ва профилей		Обоснование расхода
	на 1 дет., руб.	на год.прогр., тыс.руб.	
1. Основные материалы	225,3	92260,2	$C_M = H_M \cdot \Pi_M - H_O \cdot \Pi_O$
2. Основная заработная плата основных рабочих	0,002	177,9	$C_{зо}^o = t_{см}^{cp} \frac{A \cdot \sum t_{ум}}{60}$
3. Премии основных рабочих	0,001	71,16	$C_{нр}^o = \alpha_{нр} \cdot C_{зо}^o, \alpha_{нр} = 40\%$
4. Дополнительная заработная плата основных рабочих	0,0003	24,91	$C_{дон}^o = \alpha_{дон} \cdot (C_{зо}^o + C_{нр}^o),$ $\alpha_{дон} = 10\%$
5. Отчисления во внебюджетные фонды с заработной платы основных рабочих	0,001	81,09	$C_{отч}^o = \alpha_{нач} \cdot (C_{зо}^o + C_{нр}^o + C_{дон}^o),$ $\alpha_{отч} = 0,296$
6. Возмещение износа инструмента	0,001	63	$C_{инст} = 0,05 \cdot S_{см.об},$ $S_{см.об} = 1260$
7. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	0,08	7056,51	$C_{зод.об} = (C_a + C_p + C_з + C_{нр}) \cdot k_c$
8. Цеховые и общезаводские расходы	0,004	355,8	$C_{ц.общ.зав.} = \alpha \cdot C_{зо}^o, \alpha = 2$
<u>Итого производственная себестоимость</u>	1,08	100090,57	$C_{произв} = \sum ст.1-8$
9. Коммерческие (внепроизводственные) расходы	0,03	3002,72	$C_{ком} = \alpha_{ком} \cdot C_{произв},$ $\alpha_{ком} = 0,03$
<u>Итого полная себестоимость</u>	1,12	103093,29	$C_{полн} = \sum ст.1-9$
10. Прибыль	0,22	20618,66	$\Pi = 0,2 \cdot C_{полн}$
<u>Оптовая цена</u>	1,34	123711,95	$\Pi_{опт} = C_{полн} + \Pi$

6.4. Расчет экономического эффекта (чистого дисконтированного дохода) от реализации проекта

Таблица 6.19

Расчет ЧДД

Наименование показателей	Номер шага расчетного периода				
	1	2	3	4	5
1. Стоимостная оценка результата (объем продаж) в расчетных ценах, тыс.руб.	0	61855,98	123711,95	123711,95	123711,95
2. Коэффициент приведения к ценности денег начального шага	1	0,833	0,694	0,579	0,482
3. Дисконтированная оценка результата, тыс.руб.	0	51526,03	85856,1	71629,2	59629,2
4. Стоимостная оценка затрат в расчетных ценах, тыс.руб. 4.1. Единовременные затраты, тыс.руб. в т.ч.: НИР ОПФ ОС 4.2. Текущие затраты, тыс.руб. в т.ч.: Переменные Постоянные Налоги	795,53 795,53 0 0 0 0 0	61035,23 3182,1 1591,05 46339,13 7290,52 2632,43	109691,26 92678,26 10415,03 6597,97	109691,26 92678,26 10415,03 6597,97	73955,69 92678,26 10415,03 6597,97
5. Дисконтированная оценка затрат, тыс.руб.	795,53	50842,35	76125,73	63511,24	52871,19
6. Превышение дисконтированной оценки результата над дисконтированной оценкой затрат	-795,53	683,68	9730,37	8117,96	6758,01

$$\text{ЧДД} = \sum \dots = -795,53 + 683,68 + 9730,37 + 8117,96 + 6758,01 = 24494,49 (\text{тыс.руб.})$$

6.5. Техничко-экономические показатели

Частные показатели и обобщающие показатели:

1. Трудоемкость производства:

$$T_E = T_3/V, \quad (6.23)$$

где T_3 – отработанное время работниками предприятия (среднесписочная численность работников); V – объем производства

$$T_E = \frac{4 \cdot 1830 \cdot 0,85 \cdot 60}{409530} = 0,91 \text{ чел} \cdot \text{мин} / \text{шт}.$$

2. Материалоемкость:

$$M_E = M/V, \quad (6.24)$$

где M – материальные затраты.

$$M_E = \frac{92260223,20}{409530} = 225,28 \text{ руб} / \text{шт}.$$

3. Фондоемкость производства:

$$\Phi_E = \Phi/V,$$

где Φ – среднегодовая стоимость ОПФ.

$$\Phi_E = \frac{4773150}{409530} = 11,66 \text{ руб} / \text{шт}.$$

5. Производительность труда:

$$П_T = V/T_3, \quad (6.25)$$

$$П_T = \frac{409530}{4 \cdot 1830 \cdot 0,85} = 65,82 \text{ шт} / \text{чел} \cdot \text{час}.$$

6. Интегральные (обобщающие) показатели – рентабельность продукции:

$$P_{\Pi} = (П_{\Pi}/C) \times 100 \%, \quad P_{\Pi} = \frac{20618,66}{123711,95} \cdot 100\% = 16,67\%. \quad (6.26)$$

На основе табл. 6.1 – 6.19 и формул (6.1) – (6.26) подсчитаны основные технико-экономические показатели проекта, сведенные ниже в обобщающую табл. 6.20.

В порядке обсуждения отметим, что расчетные показатели во многом зависят от внутренних и внешних условий деятельности предприятия. Так, от местоположения региона зависят цены на материалы и энергоносители, сбыт продукции. Накладные расходы также могут варьироваться в широких пределах. Конечно, неблагоприятное сочетание указанных факторов может свести к нулю предполагаемый экономический эффект, однако разработчики инновационных проектов стараются учесть все эти обстоятельства и решение принимается, как правило, на основе взвешенных оценок. Заметим, что нами принят за основу обычный профиль, не выделяющийся из типовой номенклатуры и имеющий

среднюю цену на рынке профильной продукции. Иначе дело обстоит с эксклюзивными профилями, цена которых может превышать в два раза цену обычного профиля при той же материалоемкости. Правда и разработка технология производства такого профиля может превосходить технологию изготовления типового профиля в 1,1 – 1,4 раза.

Таблица 6.20

Технико-экономические показатели

Показатели	Значение показателей
Скорость линии, м/мин	12
Мощность электродвигателей, кВт	20
Занимаемая площадь, м ²	14,9
Годовая программа, дет.	409530
Объем производства, т	18,9
Стоимость ОПФ, тыс. руб.	3182,1
Капитальные затраты, тыс. руб.	4773,15
Число рабочих	4
Производительность труда, шт/(чел*час)	65,82
Материалоемкость, руб/шт	225,28
Фондоотдача, руб/шт	11,66
Трудоемкость, чел*мин/шт	0,91
Себестоимость продукции, тыс. руб	100090,57
Оптовая цена, тыс.руб.	123711,95
Годовой экономический эффект, тыс. руб. (сред.)	3787,6
Срок окупаемости капитальных затрат, год	1,26

Проведенные экономические расчеты чистого дисконтированного дохода показывают, что окупаемость инвестиций в профилегибочное оборудование и технологию при двухсменной работе оборудования достигается к середине второго года эксплуатации оборудования (альтернативный подсчет функционирования реальной линии показал, что за 19 месяцев работы прибыль составила около 1700 тыс. руб.). Эти реальные показатели хорошо согласуются с результатами табл. 6. 19 и 6.20.

6.6. Минимальная монтажная партия

Заказчику технологии производства новых или эксклюзивных профилей следует иметь в виду, что экономическая целесообразность выпуска профильной продукции существует, как правило, лишь при условии превышения объема производимой партии профилей объема так называемой монтажной партии.

В профилировании желательно вести прокатку крупных партий заказов профиля одного типоразмера. Это снижает простои из-за перевалковок и настроек станка.

В случае ограниченной потребности в том или ином профиле необходимо соизмерять издержки, которые будет нести поставщик при изготовлении требуемой партии нового профиля, и экономический эффект потребителя, применяющий данный профиль. Под монтажной партией гнутых профилей понимают минимальный объем выпуска профильной продукции, который экономически целесообразно производить на данном оборудовании.

Величина монтажной партии может быть выражена следующим образом:

$$M_{\Pi} = \frac{Z_c}{\mathcal{E}_{н.х.}},$$

где Z_c – суммарные затраты при освоении и производстве гнутого профиля в течение полного срока службы роликов, руб.; $\mathcal{E}_{н.х.}$ – экономическая эффективность от применения 1 погонного метра профиля, руб/м.

В первом приближении величину монтажной партии можно подсчитывать как отношение стоимости технологической оснастки к чистой прибыли от реализации 1 погонного метра профиля.

Расчет минимальной монтажной партии для профиля средних габаритных размеров и сложности показывает, что нижняя граница ее величины составляет не менее 30000 погонных метров профиля. Впрочем, величина монтажной партии зависит в большой степени от маржи между себестоимостью изготовления и рыночной ценой профиля. При средних условиях, как показывает практика, минимальная монтажная партия соответствует (15 – 30) – процентной выработке ресурса комплекта формирующих роликов.

Выводы

Внедрение технологии интенсивного деформирования и соответствующего оборудования в производство может давать годовой экономический эффект, соизмеримый с затратами на приобретение оборудования и технологии, т. е. с капитальными затратами.

Минимальная монтажная партия профилей, будучи зависимой от внешних и внутренних условий деятельности предприятия, при средних условиях соответствует (15 – 30) – процентному уровню выработки ресурса комплекта формирующих роликов.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДА ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Результаты исследований метода интенсивного деформирования применяются в Ульяновском государственном техническом университете по следующим направлениям образовательной деятельности:

1) Выполнение курсовых проектов по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением», «Листовая штамповка», «Средства автоматизации производственных процессов» (от 5 до 10 курсовых проектов в год);

2) Выполнение дипломных проектов на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением» (2 – 3 работы в год);

3) Выполнение патентного поиска и подготовка учебных заявок на изобретения в рамках курса «Основы научных исследований»;

4) Создание наглядных материалов и пособий в рамках студенческой науки (оформлены панно с описанием и представлением образцов профилей; разработаны и изготовлены действующие модели одноклетьевого прокатно-профилировочного станка и мини-пресса для испытания профилей);

5) Подготовка конкурсных работ для дней студенческой науки (ежегодно в течение последних десяти лет студенты, работающие по направлению «Профилирование в роликах», получают дипломы 1-2 степени; в течение последних пяти лет представляется по одной студенческой работе от данного направления на конкурс Министерства образования);

6) Включена лекция по профилированию в учебный курс «Теория обработки металлов давлением» и в учебное пособие с грифом УМО;

7) Подготовка аспирантов по данному направлению (обучаются 5 аспирантов; под руководством одного из авторов настоящей книги аспирантами подготовлены 2 кандидатские диссертации, одна из которых защищена в 2003 году);

8) На кафедре имеется экспериментальный двухклетевой профилегибочный станок для демонстрационных и лабораторных работ по листовой штамповке и теории обработки металлов давлением;

9) Студенты кафедры проходят учебные и преддипломные практики в НИИ (в технологических бюро и на производственной базе), специализирующемся на разработке технологии и оборудования для производства профильной продукции;

10) Выпускники кафедры распределяются и успешно работают по специальности со специализацией «Разработка технологии профилирования и профилегибочного и вспомогательного оборудования для производства гнутых профилей» (среди них – мастера, начальники цехов, ведущие и главные технологи).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей книге результаты исследований и внедрения их в производство можно резюмировать в следующем виде:

1. Для удовлетворения растущего спроса строительной индустрии на типовые (уголковые, швеллерные, корытные, С – образные) и специальные гнутые тонкостенные профили быстро меняющейся номенклатуры наиболее целесообразным является применение метода интенсивного деформирования заготовки в роликах, как наиболее удовлетворяющего условиям мелкосерийного производства.

2. Установлены и исследованы факторы интенсификации процессов формообразования типовых профилей: число переходов, углы подгибки, режимы профилирования. Разработан и исследован классификатор способов предотвращения кромковой волнистости – основного дефекта, возникающего при формообразовании профиля и препятствующего интенсификации процесса.

3. Разработанная математическая модель зоны плавного перехода позволила сформулировать критерий ограничения углов подгибки для анализа технологичности профиля, выбора и совершенствования профилегибочного оборудования. Модель с точностью до 10 – 17 % согласуется с результатами проведенных экспериментальных исследований и данными других авторов, учитывая при этом дополнительные факторы: радиусы зон сгиба и анизотропию заготовки.

4. Полученные модели НДС подгибаемых полок в зоне плавного перехода и в контактной зоне позволили оптимизировать углы подгибки с целью предотвращения кромковой волнистости. Косвенная оценка деформации и измерение микротвердости полок показали хорошее согласование теоретических и экспериментальных результатов.

5. Построенная гибридная полуэмпирическая модель числа переходов, включающая основные факторы процесса, обладает хорошими прогностическими свойствами, дает возможность оптимизации процесса и в пределах 20 % согласуется с опытными данными и частными эмпирическими моделями.

6. Выявленные предельные возможности процесса и критерий кромковой волнистости в виде индикаторной функции позволяют прогнозировать потерю устойчивости элементов и хорошо согласуются с результатами проведенных экспериментальных исследований углов подгибки за один переход.

7. Созданный алгоритм разработки технологии интенсивного деформирования, использующий результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований, позволил спроектировать технологическое оснащение и произвести отработку технологии производства профилей к внедрению с использованием только шести технологических переходов.

8. На стадии изготовления оборудования и оснастки осуществлены авторский надзор за их изготовлением и отладка оборудования. Результаты про-

веденных усовершенствований станка ГПС–350М6 включены в ТЗ на новое поколение номенклатурно-ориентированных профилегибочных машин.

9. Результаты проведенных исследований и разработок внедрены на пяти предприятиях РФ, в том числе внедрены две профилегибочные автоматизированные линии и 43 типоразмера профилей в ЗАО «ИНСИ» (г. Челябинск) со сроком окупаемости менее двух лет.

10. Годовой экономический эффект от внедрения технологии интенсивного деформирования и соответствующего оборудования соизмерим с капитальными затратами на приобретение технологии и оборудования и для типовой профилегибочной линии составляет более 3 млн. руб. Минимальная монтажная партия профилей без учета капитальных затрат на приобретение оборудования соответствует (15 – 30) – процентному уровню выработки ресурса комплекта формующих роликов.

11. Результаты исследований используются в учебном процессе в Ульяновском государственном техническом университете.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство гнутых профилей (оборудование и технология) / Под общ. ред. И. С. Тришевского и др. — М. : Металлургия, 1982. — 384 с.
2. Колганов, И. М. Повышение несущей способности панельных конструкций ЛА с профилями, гнутыми из листа / И. М. Колганов, С. В. Филимонов, Н. А. Щавлева // *Авиационная промышленность*. — 1999. — № 3. — С. 9 — 12.
3. Профили гнutoкатанные из листовых алюминиевых сплавов : Научно-технический отчет № 5448 — 227 — 88. — М. : НИАТ, 1988. — 75 с.
4. Марковцев, В. А. Разработка и внедрение технологии и оборудования для изготовления прямолинейных листовых профилей для авиационных конструкций методом стесненного изгиба : Дисс. канд. техн. наук: 05.07.04. — М. : НИАТ, 1991. — 202 с.
5. Самолеты ближайшего будущего // *Гражданская авиация*. — 1990. — № 3. — С. 22 — 27.
6. Колганов, И. М. О возможности использования в конструкциях изделий алюминиево — литиевых сплавов / И. М. Колганов, Б. В. Богданов // *Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология*. — 1992. — Вып. 1(22). — С. 9 — 12.
7. Гайнутдинов, Р. Г. Усталостная прочность и коррозионная стойкость фюзеляжных стрингеров из прессованных и катанных полуфабрикатов / Р. Г. Гайнутдинов // *Авиационная промышленность*. — 1985. — № 5. — С. 19 — 20.
8. Исследование коррозионной активности фюзеляжного конденсата пассажирских самолетов / А. М. Свиницкий, Н. Ф. Воронкин, А. В. Карлашов, Р. Г. Гайнутдинов // *Физико — химическая механика материалов*. — 1982. — № 5. — С. 70 — 72.
9. Карлашов, А. В. Исследование коррозионной стойкости элементов внутреннего силового набора / А. В. Карлашов, А. М. Свиницкий, П. В. Токарев // *Авиационная промышленность*. — 1986. — № 11. — С. 69 — 71.
10. Колганов, И. М. Изготовление панелей с гнутыми профилями из перспективных алюминиевых сплавов / И. М. Колганов, А. С. Башилов, Б. В. Богданов // *Авиационная промышленность*. — 1994. — № 9 — 10. — С. 3.
11. Picard, C. A. Emploi des nouveau materiaux et des nouvelles technologies dans la structure des avions modernes / C. A. Picard // *L'aeronautique et l'astronautique*. — 1988. — № 130. — V. 3. — P. 4 — 29.
12. Habermann, A. Metallische Werkstoffe und Fertigungstechnologie fur die Luftfahrt / A. Habermann // *Neue Werkstoffe*. — 1987. — № 22. — V. 36. — P. 37 — 40.
13. Строеение и свойства авиационных материалов / А. Ф. Белов, Г. П. Бенедиктова, А. С. Висков и др. / Под ред. акад. А. Ф. Белова. — М. : Металлургия, 1989. — 368 с.
14. Trichett, A. In for the long-haul / A. Trichett // *Metal Bulletin Monthly*. — 2000. — January. — P. 26–27.

15. Проскуряков, Г. В. Стесненный изгиб / Г. В. Проскуряков // *Авиационная промышленность*. – 1966. – № 2. – С. 9 – 13.
16. Гиммельфарб, А. Л. Основы конструирования в самолетостроении / А. Л. Гиммельфарб. – М. : Машиностроение, 1980. – 367 с.
17. Власов, В. И. Краевые задачи в областях с криволинейной границей / В. И. Власов. – М. : ВЦ АН СССР, 1987. – 272 с.
18. Проскуряков, Г. В. Опыт промышленного изготовления листовых профилей и деталей из них / Г. В. Проскуряков, А. В. Нуждов, В. И. Филимонов // *Авиационная промышленность*. – 1990. – № 1. – С. 3. – 4.
19. Изготовление методом интенсивного деформирования профилей из листа и их внедрение в авиастроении / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, И. М. Колганов, С. В. Филимонов, П. В. Куприн // *Авиационная промышленность*. – 2001. – № 4. – С. 21 – 23.
20. Duffy, P. HAL / Ilyushin link on new twinjet / P. Duffy // *Flight international*. – 2001. – March. – № 13. – V. 19. – P. 16.
21. Марковцев, В. А. Автоматизированная линия изготовления С – образного профиля методом стесненного изгиба / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // *Вестник УлГТУ. Сер. Машиностроение, строительство*. – 1998. – № 2. – С. 50 – 55.
22. Гнутые профили проката. Справочник / И. С. Тришевский, Н. М. Воронцов, Ю. В. Дзина и др. – М. : Металлургия, 1967. – 379 с.
23. Гнутые профили проката. Справочник / Под ред. И. С. Тришевского – М. : Металлургия, 1980. – 352 с.
24. Масленников, Ю. Производство стального рулонного листа с покрытием / Ю. Масленников, Ю. Волков // *Металлоснабжение и сбыт*. – 1999. – № 2. – С. 36–39.
25. Гуров, А. Россия и Европейский Союз: состояние и перспективы развития торговли черными металлами / А. Гуров // *Металлоснабжение и сбыт*. – 1999. – № 2. – С. 52 – 57.
26. Елисеев, Ю. Профнастил и металлочерепица: растущий спрос / Ю. Елисеев // *Металлоснабжение и сбыт*. – 1999. – № 2. – С. 40 – 42.
27. Drei Grossen end drei Ausfuhrungen // *Industrie – Anzeiger*. – 1999. – № 50. – V.21. – S. 48.
28. Скрипачев, А. В. Изготовление из листа профилей повышенной жесткости стесненным изгибом на кромкогибочных машинах : Дисс. канд. техн. наук. – Тула : ТПИ, 1983. – 242 с.
29. Арышенский, Ю. М. Разработка техпроцесса изготовления профилей из волокнистых композиционных материалов системы «Al – сталь» стесненным изгибом / Ю. М. Арышенский, В. Б. Хардин, А. В. Цветков // *Авиационная промышленность*. – 1990. – № 4. – С. 18 – 21.
30. Проскуряков, А. Г. Исследование возможности формообразования профилей из алора – 41 в кромкогибочных машинах / А. Г. Проскуряков // *Авиационная промышленность*. – 1989. – № 6. – С. 10 – 11.

31. Niebel, B.W Modern manufacturing process engineering / B. W Niebel, A. B. Draper, R. A. Wysk. – New York : McGraw – Hill Publishing Company, 1989. – 986 p.
32. Яковлев, С. П. Штамповка анизотропных заготовок / С. П. Яковлев, В. Д. Кухарь. – М. : Машиностроение, 1986. – 136 с.
33. Ковка и штамповка : Справочник в 4 т. Т.4. Листовая штамповка / Под ред А. Д. Матвеева. – М. : Машиностроение, 1987. – 544 с.
34. Вдовин, С. И. Упругопластический изгиб тонкого листа поперечной силой / С. И. Вдовин, С. В. Семин // Кузнечно – штамповочное производство. – 1995. – № 11. – С. 5 – 7.
35. 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.
36. Ершов, В. И. Изгиб идеально пластичной полосы со сжатием в штампе / В. И. Ершов, А. С. Зажигин // Известия вузов. Авиационная техника. – 1972. – № 2. – С. 170 – 173.
37. Комаров, А. Д. Развитие и совершенствование процессов штамповки деталей эластичной средой / А. Д. Комаров // Кузнечно – штамповочное производство. – 1982. – № 12. – С. 27 – 30.
38. Разработка и исследование процесса стесненного изгиба листовых заготовок эластичной средой / А. Д. Комаров, В. А. Барвинок, А. А. Шаров, В. К. Моисеев // Кузнечно – штамповочное производство. – 1966. – № 10. – С. 25 – 29.
39. 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.
40. А. с. 1049138 СССР, МКИ В21D5/06. Способ формообразования листовых профилей и устройство для его осуществления / И. А. Кисиленко, Шитарев. – Опубл. 23.10.83, Бюл. № 39.
41. Альперт, В. Н. Теоретическое исследование процесса получения профилей при протягивании через инструментальную фильеру металлической ленты с непрерывно скользящим приложением сжимающего усилия в процессе формообразования угла / В. Н. Альперт, Г. В. Проскуряков, А. С. Зажигин // Известия вузов. Авиационная техника. – 1968 – № 3. – С. 107 – 113.
42. Колганов, И. М. Исследование процесса формообразования профилей стесненным изгибом в инструментальной фильере / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков. – Тольятти, 1979. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ 15.02.79, Д 1096–79.
43. Способ гибки профилей проглаживанием по пуансону / Ю. М. Арышенский, В. Ю. Ненашев, А. Ю. Матвеев, Ф. В. Гречников // Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли. – М. : НИАТ, 1992. – С. 30–36.
44. Lignes de profilage // Machines et production. – 1999. – 706e. – P. 67.

45. Roll forming line for USSR // Sheet metal industry. – 1992. – № 9. – V. 68. – P. 40.
46. 2. 500000 pounds contract // Sheet metal industry. – 1992. – № 1. – V. 69. – P. 26.
47. ТР 1.4.1624 – 86. Изготовление гнутых профилей методом стесненного изгиба из сплава 1420 / Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов, А. С. Москвин. – М. : НИАТ, 1986. – 24 с.
48. Изготовление тонкостенных гнутых профилей из сплава 01420 / Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин и др. // Авиационная промышленность. – 1987. – № 3. – С. 34 – 36.
49. Разработка технологии изготовления профилей стесненным изгибом из сплава АБМ – 1 / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 8. – С. 10 – 12.
50. 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.
51. 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.
52. Марковцев, В. А. Выбор диаметров роликов для формообразования профиля стесненным изгибом / В. А. Марковцев, Г. В. Проскуряков, Г. В. Коновалов // Авиационная промышленность. – 1990. – № 8. – С. 8 – 9.
53. Марковцев, В. А. Выбор схемы правки профилей при их формообразовании методом стесненного изгиба / В. А. Марковцев, Г. В. Проскуряков // Авиационная промышленность. – 1988. – № 7. – С. 31 – 37.
54. Исследование и разработка способа изменения кривизны профиля при стесненном изгибе / Г. В. Проскуряков, Е. Н. Чебурахин, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 9 – 13.
55. Марковцев, В. А. Правильное устройство профилегибочной линии 4MIS–10 японской фирмы NAKATA / В. А. Марковцев // Авиационная промышленность. – 1985. – № 11. – С. 89.
56. Илюшкин, М. В. Способы улучшения качества поверхности гнутых профилей с покрытием при профилировании / М. В. Илюшкин, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Современные технологии в машиностроении: Тез. 4 Всероссийской научно – практической конф. – Пенза : ПДЗ, 2001. – С. 91–93.
57. Филимонов, В. И. Интенсификация процесса формообразования стесненным изгибом профилей для авиационных конструкций : Дис. канд. техн. наук: 05.07.04. – Самара : Самарский аэрокосмический ун-т, 1993. – 199 с.
58. Тришевский, И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Metallurgia, 1980. – 288 с.

59. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.
60. РТМ 1.4.2005 – 90. Изготовление профилей из листов алюминиевых сплавов Д16, В95, 1420 методом стесненного изгиба / Ю. М. Арышенский, Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов и др. – М. : НИАТ, 1991. – 85 с.
61. Марковцев, В. А. Потеря устойчивости боковых полок на предварительных переходах при профилировании / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Техничко – економические проблемы промышленного производства : Тез. докл. международной конф. – Набережные Челны : КамПИ, 2000. – С. 148.
62. Производство и применение гнутых профилей проката. Справочник / Под ред. И. С. Тришевского. – М. : Металлургия, 1975. – 536 С.
63. Колганов, И. М. Исследование процессов формообразования листовых профилей стесненным изгибом при волочении : Дис. канд. техн. наук : 05.07.04. – Куйбышев : Куйбышевский авиационный ин-т, 1984. – 257 с.
64. Марковцев, В. А. Изготовление профилей с бортами малой высоты / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Современные технологии в машиностроении: Тез. докл. 4 Всероссийской научно – практической конф. – Пенза : ПДЗ, 2000. – Ч. 1. – С. 25 – 28..
65. Марковцев, В. А. Напряжения в подгибаемых полках при профилировании / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Техничко – економические проблемы промышленного производства : Тез. докл. международной конф. – Набережные Челны : КамПИ, 2000. – С. 51.
66. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей и особенности их формообразования / И. М. Колганов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Авиационная промышленность. – 2001. – № 3. – С. 21 – 25.
67. Patent 4327252 Germany, ISSN F 16 S 1/04. Blechprofilteil mit Sicke / Alfons Jean Knauf . – Ver. 16.02.95.
68. Niebel, B. W. Modern manufacturing process engineering / B. W. Niebel, A. B. Draper, R. A. Wysk. – New York : McGraw – Hill Publishing Company. – 1989. – 986 p.
69. Тришевский, И. С. Исследование процесса и разработка режима профилирования несимметричных гнутых профилей / И. С. Тришевский, В. И. Мирошниченко // Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката. – Харьков : УкрНИИмет. – 1970. – № 15. – С. 155 – 173.
70. А. с. 1820547 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых уголковых профилей / В. И. Филимонов, А. С. Москвин, В. А. Марковцев. – Оpubл. 03.06.91. ДСП.
71. ТР 1.4.1624 – 86. Изготовление гнутых профилей методом стесненного изгиба из сплава 1420 / Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов, А. С. Москвин. – М. : НИАТ, 1986. – 24 с.

72. Bogojawlenski, K. N. Technologie der Fertigung von Leichtbauprofilen / K. N. Bogojawlenski, A. Neubauer, V. W. Ris. – Leipzig : VEB DVG. – 1979. – 566 p.

73. Патент 1819170 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления сортовых гнутых профилей / А. П. Игнатенко, В. В. Клепанда, С. Н. Михайлов и др. – Оpubл. 30.05.93, Бюл. № 20.

74. А. с. 1625544 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства несимметричного уголкового профиля / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, Н. Т. Пахомов, А. А. Ушаков. – Оpubл. 07.02.91, Бюл. № 5.

75. А. с. 1690890 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ поштучного профилирования уголков / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, Р. И. Кириллов, А. А. Ушаков. – Оpubл. 15.11.91, Бюл. № 42.

76. 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.

77. А. с. 1748903 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / Г. В. Проскуряков, В. А. Марковцев, С. Г. Семин. – Оpubл. 23.07.92, Бюл. № 27.

78. 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.

79. Патент 2056194 Россия, МКП⁷ В 21 D 5/06. Инструмент профилегибочного стана / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, В. Ф. Афанасьев, В. Н. Кочубее. – Оpubл. 20.03.96, Бюл. № 8.

80. А. с. 1388141 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления V – образных гнутых профилей / Н. В. Пшеничная, М. Е. Докторов, Э. В. Кузмин и др. – Оpubл. 15.04.88, Бюл. № 14.

81. А. с. 1019727 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления несимметричных гнутых профилей / И. С. Тришевский, А. П. Антипенко, Э. С. Дахновский и др. – Оpubл. 23.12.83, Бюл. № 47.

82. 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.

83. А. с. 1703217 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых неравнополочных швеллеров / Р. И. Кириллов, В. Г. Антипанов, В. В. Пахарев, В. И. Гридневский. – Оpubл. 17.01.92, Бюл. № 1.

84. 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.

85. А. с. 1291237 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления сортовых гнутых профилей / А. Л. Игнатенко, Я. В. Хижняков, А. П. Антипенко и др. – Оpubл. 23.02.87, Бюл. № 7.

86. Патент 1431158 Россия, МКП⁷ 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.

87. А. с. 1676708 Россия, МКП⁷ В 21 D 5/06. Способ формовки неравнополочных швеллерных профилей / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, А. П. Янчинский, Н. Т. Пахомов. – Оpubл. 15.09.91, Бюл. № 34.

88. А. с. 1328029 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства профилей высокой жесткости / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. Н. Кочубеев и др. – Оpubл. 07.08.87, Бюл. № 29.

89. А. с. А.С. 1334463 СССР МКИ В 21 D 5/06 Способ изготовления гнутых профилей / Федосеенко В.И., Клепанда В.В., Тишков В.В. и др. – Оpubл. 23.02.90. – Бюл. № 7.

90. А. с. 16343447 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей проката / О. В. Марьин, Е. Н. Горбач, В. Н. Босый и др. – Оpubл. 15.03.91, Бюл. № 10.

91. А. с. 1191138 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых неравнополочных профилей со ступенчатой стенкой / И.С. Тришевский, М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная и др. – Оpubл. 15.11.85, Бюл. № 42.

92. А. с. 1299646, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / М. Е. Докторов. – Оpubл. 30.03.87, Бюл. № 12.

93. Патент 2059451 Россия, МКП⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления тонкостенных профилей из полосовых заготовок / И. В. Зверев, С. Г. Гумиров., С. Ю. Жаринов. – Оpubл. 10.05.96, Бюл. № 13.

94. ТР 1.4.1780 – 87 Изготовление профилей из плакиров. листов алюминиевых сплавов Д164, 1163 и В95 пч методом стесненного изгиба. – М. : НИАТ. – 1987. – 19 с.

95. А. с. 1169772 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей проката / Ф. З. Абдулин, В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, Б. Н. Глухов. – Оpubл. 30.07.85, Бюл. № 28.

96. А. с. 1003962 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей / И. С. Тришевский, Я. В. Хижняков, В. Ф. Гробин и др. – Оpubл. 15.03.83, Бюл. № 10.

97. Патент 2037352 Россия, МКП⁷ 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.

98. А. с. 863064 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 25.09.81, Бюл. № 34.

99. 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, Б. В. Богданов и др. – Оpubл. 16.06.90. ДСП.

100. А. с. 755369 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 15.08.80, Бюл. № 30.
101. 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.
102. А. с. 1172626 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления несимметричных гнутых листовых профилей проката / И. С. Тришевский, В. Г. Антипанов, В. И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 15.08.85, Бюл. № 30.
103. Исследование и разработка способа изменения кривизны профиля при стесненном изгибе / Е. Н. Чебурахин, Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов, А. С. Москвин // Авиационная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 9 – 13.
104. Патент 2006315 Россия, МКП⁷ 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.
105. А. с. 1780896 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых корытных профилей / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. К. Визгалов, А. А. Ушаков. – Оpubл. 15.12.92, Бюл. № 46.
106. А. с. 1754266 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых тонкостенных профилей / Н. М. Волковой, И. А. Приходько, В. В. Костицын и др. – Оpubл. 15.08.92, Бюл. № 30.
107. Патент 1817717 СССР, МКП⁷ 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.
108. 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.
109. А. с. 1726086 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Гнутый профиль и способ его производства / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, А. И. Стариков и др. – Оpubл. 15.04.92, Бюл. № 14.
110. А. с. 1248690 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления листовых деталей с отбортовками / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. И. Колганов, В. И. Филимонов. – Оpubл. 07.08.86, Бюл. № 29.
111. Патент 2019335 Россия, МКП⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей из труднодеформируемых алюминиевых сплавов / И. М. Колганов, Б. В. Богданов, А. С. Башилов и др. – Оpubл. 15.09.94, Бюл. № 17.
112. 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.
113. 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.

114. А. с. 916017, МКИ В 21 D 5/06. Способ производства гнутых профилей / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Г. В. Олейник и др. – Оpubл. 30.03.82, Бюл. № 12.

115. Патент 1831396 Россия, МКП⁷ 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.

116. 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.

117. А. с. 66831 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / М. Е. Докторов, Э. В. Кузьмис, Н. В. Пшеничная, И. Б. Менович. – Оpubл. 23.03.89, Бюл. № 11.

118. А. с. 1606225 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / М. Е. Докторов, Е. Н. Горбач, Г. В. Олейник и др. – Оpubл. 15.11.90, Бюл. № 42.

119. А. с. 1579603 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления замкнутых сварных гнутых профилей с гофрами на боковых стенках / М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная, Е. И. Кириенко – Гринь и др. – Оpubл. 23.07.90, Бюл. № 27.

120. А. с. 1696042 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых тонкостенных профилей / Н. Л. Волковой, Р. Ю. Дебердеев, А. И. Клементьева и др. – Оpubл. 7.12.91, Бюл. № 45.

121. А. с. 1655598 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / В. М. Щеглов, В. Я. Тишков, Г. Е. Барабанцев, В. Т. Рябинков. – Оpubл. 15.06.91, Бюл. № 22.

122. А. с. 1563804 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления сварных замкнутых профилей / В. Т. Рябинков, Г. Е. Баранцев, А. Л. Тюляпин и др. – Оpubл. 15.05.90, Бюл. № 18.

123. А. с. 1498577 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления замкнутых профилей коробчатого типа / Н. И. Конюков, А. И. Гулько, В. М. Фролов и др. – Оpubл. 07.08.89, Бюл. № 29.

124. 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.

125. 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.

126. А. с. 294406 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей коробчатого сечения / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. В. Клепанда, А. Н. Коновалов. – Оpubл. 13.09.72, Бюл. № 27.

127. Рене, И. П. Пластический изгиб листовой заготовки / И. П. Рене // Труды Тульского механического ин-та. – 1950. – Вып.4. – С. 146 – 162.

128. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

129. Давыдов, В. И. Производство гнутых тонкостенных профилей / В. И. Давыдов, М. П. Максаков. – М. : Металлургиздат, 1959. – 240 с.
130. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М. : ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
131. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М. : Металлургия, 1980. – 456 с.
132. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
133. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
134. Арышенский, Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. – М. : Металлургия, 1990. – 304 с.
135. Ершов, В. И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов. – М. : Машиностроение, 1990. – 312 с.
136. Матвеев, А. Д. Деформация при крутом знакопеременном изгибе листа с неизменной толщиной / А. Д. Матвеев // Известие вузов. Машиностроение. – 1984. – № 1. – С. 11 – 15.
137. 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.
138. Кокадо, Д. О возникновении кромковой волнистости при холодном профилировании дуговых желобчатых сечений с боковыми фланцами / Д. Кокадо, Е. Онода // Труды ун-та г. Киото. Инженерный факультет. – 1977. – Т. 39. – № 2. – С. 225 – 244. — Перевод с яп. № А – 67428. – М. : ВЦП НТЛД, 1978. – 31 с.
139. Влияние касательных напряжений на формирование угловой зоны при стесненном изгибе / Ю. Н. Берлет, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Механика деформируемых сред в технологических процессах. – Иркутск : ИрГТУ. – 2000. – С. 63 – 67.
140. Романенко, В. П. Мини – станы для производства токоистенных гнутых профилей / В. П. Романенко, Е. А. Харитонов, Д. В. Нестеров // Производство проката. – 2000. – № 7. – С. 24 – 26.
141. Колганов, И. М. Применение модели пластического формоизменения / И. М. Колганов, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Авиационная промышленность. – 1996. – № 3 – 4. – С. 26 – 30.
142. Bhattacharyya, D. The prediction of deformation length in cold roll – formed forming / D. Bhattacharyya, P. D. Smith, I. F. Collins // Journal of Mechanical Working Technology. – 1984. – № 2. – V. 9. – P. 181 – 191.
143. Damm, K. Ermittlung von Langsanderungen beim Walzprofilieren durch mathematische Beschreibung des Bandkantenverlaufs / K. Damm, X. Wang // Industrie Anzeiger. – 1987. – № 51. – P. 39 – 40.

144. Бурыкин, А. А. О процессе образования гофров на гнутых профилях / А. А. Бурыкин // Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. – М. : ГИТИЛЧЦМ, 1964. – С. 321 – 329.
145. 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.
146. Oesten, U. Die kontinuierliche Fabrikation von Blechprofilen / U. Oesten // Blech, Rohre, Profile. – 1979. – № 3. – V. 26. – P. 112 – 116.
147. Киути, М. Современное состояние CAD/CAM в области профилирования в валках / М. Киути // Сосэй то како. – 1986. – Том 27. – № 300. – С. 184 – 192. – Перевод с яп. № Б – 100/3. – Киев : ТПП УССР, 1987. – 21 с.
148. Филимонов, С. В. Зависимость деформационных параметров подгибаемой полки профиля от применяемого способа предотвращения волнистости ее кромки / С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Научно – технический калейдоскоп. – 2002. – № 1. – С. 53 – 58.
149. Арышенский, Ю.М. Теория и расчет листовой штамповки анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский. – Саратов : Изд. СГУ, 1973. – 111 с.
150. Марковцев, В. А. Обеспечение натяга при профилировании с целью уменьшения кромковой волнистости / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Современные технологии в машиностроении : Тез. 4 Всероссийской научно – практической конф. – Пенза : ПДЗ, 2001. – С. 163 – 164.
151. Колганов, И.М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования / И. М. Колганов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2001. – 108 с.
152. Берлет, Ю. Н. Проблема кромковой волнистости при профилировании в роликах / Ю. Н. Берлет, С. В. Филимонов // Техничко – экономические проблемы промышленного производства. – Набережные Челны : Изд-во Камского политехнического института. – 2000. – С. 147 – 148.
153. Деформационные характеристики подгибаемых полок и оптимизация углов подгибки при профилировании / Ю. Н. Берлет, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Кузнечно – штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – № 6. – С. 8 – 12.
154. Филимонов, С. В. Возникновение кромковой волнистости при профилировании / С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 2002. – № 1. – С. 32– 38.
155. Лысов, М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. И. Лысов. – М. : Машиностроение, 1966. – 236 с.
156. Блейх, Ф. Устойчивость металлических конструкций / Ф. Блейх. – М. : Физматгиз, 1959. – 544 с.
157. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
158. Потеря устойчивости и выпучивание конструкций / Под ред. Дж. Томсона, Дж. Ханта. – М. : Наука, 1991. – 424 с.

159. Количество переходов и критерий подобия при профилировании / В. А. Марковцев, С. В. Филимонов, М. В. Кокорин, В. И. Филимонов // Современные технологии в машиностроении : Тез. докл. 5 Всероссийской научно – практической конф. – Пенза : ПДЗ, 2002. – Ч. 2. – С. 168 – 170.
160. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1972. – 440 с.
161. Вольмир, А. С. Устойчивость упругих систем / А. С. Вольмир. – М. : Физматгиз. - 1963. – 880 с.
162. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наукова думка. – 1988. – 736 с.
163. Титов, Ю. А. Разработка металлосберегающих процессов штамповки деталей типа тел вращения вытяжкой – отбортовкой : Дисс. канд. техн. наук: 05.03.05. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. — 178 с.
164. Филимонов, С. В. Исследование технологических возможностей гибочно–прокатного станка ГПС-300 / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов // Внутривузовская студенческая научно – техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск : УлГТУ, 1999. – С. 37–38.
165. Филимонов, В. И. Концепция исследования предельных возможностей процесса профилирования / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Ресурсосберегающие технологии листовой и объемной штамповки. Всероссийская научно – техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск : УГТУ, 1997. – С. 69 – 70.
166. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение. – 1981. – 184 с.
167. Экспериментальный пресс "ПИГПЛУ–1" для испытания гнутых профилей на локальную потерю устойчивости / В. А. Марковцев, С. В. Филимонов, В. И. Филимонов, М. В. Илюшкин, В. В. Гробов // Современные технологии в машиностроении. V Всероссийская научно – практическая конференция. Сборник материалов. – Пенза : ПДЗ, 2002. С. 36–38.
168. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : ГНТИМЛ. – 1963. – 232 с.
169. Лейченко, А. М. Производство и применение гнутых профилей / В сб. Рационализация профилей проката / А. М. Лейченко. – М. : Изд-во ВЦСПС, 1956. – С. 189 – 203.
170. Макарова, Н. В. Статистика в Excel / Н. В. Макарова, В. Я. Трофимец. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
171. Технологичность конструкции изделия : Справочник / Под ред. Ю. Д. Амирова. – М. : Мишиностроение, 1990. – 768 с.
172. Филимонов, В. И. О структуре системы CAD/CAM для профилирования в роликах / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Ресурсосберегающие технологии листовой и объемной штамповки. Всероссийская научно –

техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск : УлГТУ, 1997. – С. 68 – 69.

173. А. с. 1780897 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ гибки профилей / Т. В. Перязева, А. С. Москвин, Т. В. Янкевич. – Опубл. 15.12.92, Бюл. № 46.

174. Березовский, С. Ф. Производство гнутых профилей / С. Ф. Березовский, Ф. М. Кропылев. – М. : Metallurgia, 1978. – 152 с.

175. Березовский, С. Ф. Эксплуатация и ремонт оборудования профилегибочных станков / С. Ф. Березовский. – Челябинск : Metallurgia. Челяб. Отд-ние, 1991. – 175 с.

176. Марковцев, В. А. О соотношении силовых параметров при профилировании полосы / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Механика и процессы управления. Сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 1998. – С. 50 – 55.

177. Берлет, Ю. Н. Способ предотвращения кромковой волнистости при формообразовании корытных и С-образных профилей в роликах / Ю. Н. Берлет, С. В. Филимонов // Вузовская наука в современных условиях. XXXV научно – техническая конференция УлГТУ. Тезисы докладов. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – С. 31 – 32.

178. Филимонов, В. И. Обеспечение заданной точности поперечного сечения профиля при гибке в роликах / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, В. А. Марковцев // Перспективные методы и средства обеспечения качества летательных аппаратов. Сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – С. 164 – 169.

179. Филимонов, С. В. Изготовление профилей заданной точности методом гибки–прокатки в роликах / С. В. Филимонов // Современные технологии в машиностроении. IV Всероссийская научно – практическая конференция. Сборник материалов. – Пенза : ПДЗ, 2001. – С. 81 – 82.

180. Филимонов, С. В. Влияние схем формообразования на параметры точности гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов, М. В. Илюшкин // XXXIV Научно – техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – С. 44 – 45.

181. А. с. 1077680 СССР, D 5/06. Валок рабочей клетки профилегибочного стана / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная, В. Т. Герасько, В. Б. Калужский. – Опубл. 07.03.84, Бюл. № 9.

182. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.

183. Филимонов, С. В. Схема предотвращения волнистости кромки при формообразовании широкополочного профиля в роликах / С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Современные технологии в машиностроении. IV Всероссийская научно – практическая конференция. Сборник материалов. – Пенза : ПДЗ, 2001. – С. 93 – 95.

184. Изготовление С-образных профилей с рифтами в донной части / В. А. Марковцев, С. В. Филимонов, В. И. Филимонов, П. Н. Куприн // Современные

технологии в машиностроении. V Всероссийская научно – практическая конференция. Сборник материалов. – Пенза : ПДЗ, 2002. – С. 41 – 44.

185. Патент на изобретение по заявке 003646 от 07.12.2001 МКП⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления корытного профиля / С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Положительное решение ФИПС № 2001103683/02 от 09.04.2001.

186. Юрченко, А. А. Новая технология валковой формовки просечных профилей / А. А. Юрченко, Ю. А. Плеснецов // Кузнечно – штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2001. – № 8. – С. 8 – 10.

187. Филимонов, С. В. Разработка технологии интенсивного формообразования гнутых тонкостенных профилей в роликах : Дис. канд. техн. наук: 05.03.05. – Ульяновск : Ульяновский гос. технический ун-т, 2003. – 223 с.

188. Филимонов, В. И. Перспективные ресурсосберегающие технологии и оборудование для интенсивного формообразования гнутых профилей и гофрированных панелей / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев // Вопросы технологии машиностроения. Материалы выездного заседания Головного Совета «Машиностроение» Министерства образования РФ, 29 – 30 сентября 2003 г. Под ред. академика РАН К. С. Колесникова. – г. Ульяновск : УлГТУ. – С. 44 – 51.

189. Проскуряков, Г. В. Об одном подходе к разработке специального правильного устройства / Г. В. Проскуряков, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология. – 1989. – № 1. – С. 27 – 34.

190. Расчеты экономической эффективности новой техники : Справочник / Под ред. К. М. Великанова. – Л. : Машиностроение, 1989. – 448 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ПРОБЛЕМЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ	5
1.1. <i>Применение гнутых тонкостенных профилей и требования к ним</i>	5
1.2	

Учебное издание

Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования
в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / Учебное пособие.

Авторы

Филимонов Сергей Вячеславович,

Филимонов Вячеслав Иванович

Редактор Н. А. Евдокимова

Технический редактор В. А. Марковцев

Подписано в печать 30.06.2004. Формат 60 ? 84/16. Бумага тип. №1. Печать
трафаретная. Усл. печ. л. 12,79. Уч. – изд. л. 12,50. Тираж 100 экз. Заказ .

Ульяновский государственный технический университет.

432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.