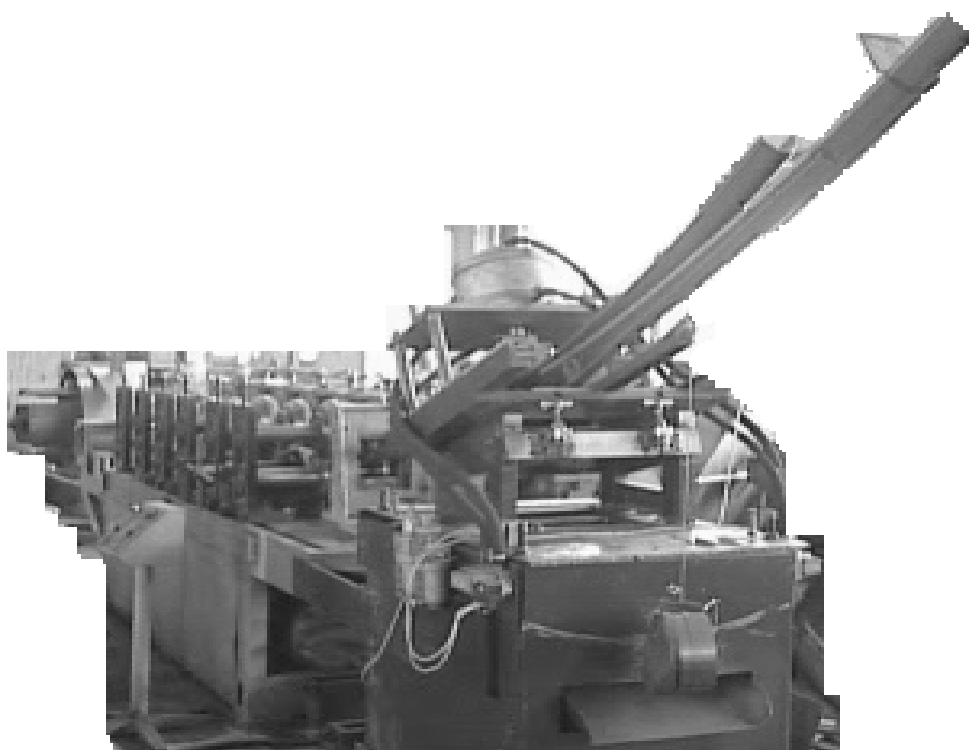


В.А. Марковцев, В.И. Филимонов

Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей



Ульяновск

Издательство УлГТУ «Венец»

2006

ООО «НИИ «МИТОМ» -

**Ульяновский государственный
технический университет**

В. А. Марковцев, В. И. Филимонов

**Формообразование стесненным
изгибом в роликах и правка
гнутых тонкостенных
профилей**

Ульяновск-2005

УДК 621.7
ББК 22.251
Ф53

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор О.С. Кошелев,
доктор технических наук, доцент Н.А. Красильников

Марковцев, В. А., Филимонов В.И.

Ф53 Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. – 246 с. ; илл.
ISBN 5 – 89146 – 500 – 0

Книга предназначена для аспирантов специальности 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением» и разработчиков технологии интенсивного формообразования гнутых профилей в роликах, а также может быть полезно технологам и конструкторам, работающим в области профилирования. Студенты, специализирующиеся в области обработки металлов давлением (специальность 120400), здесь также могут найти материал к выполнению курсовых и дипломных проектов.

Работа подготовлена на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ и ООО «НИИ «МИТОМ».

УДК 621.7
ББК 22.251

Научное издание

МАРКОВЦЕВ Владимир Анатольевич, ФИЛИМОНОВ Вячеслав Иванович

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СТЕСНЕННЫМ ИЗГИБОМ В РОЛИКАХ
И ПРАВКА ГНУТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Редактор Н. А. Евдокимова
Технический редактор В.Н. Кокорин

Подписано в печать 30. 08. 2005. Формат 60 × 84/16. Бумага тип. №1. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 16,79. Уч.-изд. л. 16,50. Тираж 120 экз. Заказ xxx .

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

© Марковцев, В. А. Филимонов, В.И.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики проблема ускорения научно-технического прогресса и перевода экономики на интенсивный путь развития на основе повышения эффективности и качества продукции приобретает особое значение. Металлообработка и машиностроение являются фундаментом, на котором строится материально-техническая база страны. Современное машиностроение в условиях конкуренции должно сопровождаться быстрым ростом масштабов производства и производительности труда при все более строгой оптимизации принимаемых конструктивных и технологических решений.

Получение точных заготовок, приближающихся по конфигурации, размерам и чистоте поверхности к готовым деталям, является одним из направлений технического прогресса в современном машиностроении. Среди множества методов получения прогрессивных заготовок обработка металлов давлением стоит на одном из первых мест среди них. Она обладает рядом преимуществ перед другими видами обработки: высокой производительностью, рациональным использованием металла, возможностью автоматизации и механизации и т.п., поэтому определение эффективных направлений интенсификации этих процессов имеет важное научное и практическое значение.

Это хорошо видно на примере авиационной отрасли. В связи с повышающимися требованиями к конструкциям летательных аппаратов в части прочности, жесткости и ресурса значительно возросла потребность в производстве узлов и деталей, изготовленных из листовых материалов, особенно плакированных, обладающих повышенными коррозионными свойствами. Тонкостенные профили из материалов, обладающих низкой пластичностью, а также из традиционных авиационных алюминиевых сплавов получают, как правило, прессованием. Однако получение тонкостенных профилей из высокопрочных сплавов прессованием затруднено из-за низкой стойкости очка матрицы, плохого качества и больших допусков на толщину, в то время как получение профилей с плакировкой на данной стадии развития технологии этим способом невозможно. Изготовление профилей в штампах или кромкогибочных устройствах является малопроизводительным; применение этих технологий ограничено небольшой длиной изготавливаемых деталей и простыми конфигурациями поперечных сечений профилей. Традиционное профилирование в авиации не используется в связи с его ориентацией на серийный характер производства (из-за громоздкого оборудования, большого количества оснастки, больших временных потерь при переналадке), а также из-за больших радиусовгиба и утонения в зоне сгиба, что снижает служебные характеристики профилей. В настоящее время широкое распространение получил стесненный изгиб (изгиб со сжатием), который позволяет получать листовые профили из высокопрочных и плакированных материалов с сечением зоны сгиба, приближающимся к сечению прессованного профиля. Широкое

внедрение в промышленность этого способа позволяет значительно снизить массу изделий, металлоемкость и трудоемкость их изготовления с одновременным повышением качества и надежности.

Метод стесненного изгиба был создан Г. В. Проскуряковым в 60-х годах прошлого столетия и интенсивно разрабатывался применительно к производству деталей в штампах, кромкогибочных устройствах, инструментальных фильерах и в роликах профилегибочных станков.

Если изучению процесса стесненного изгиба в кромкогибочных устройствах, штампах, при гибке волочением посвящено значительное количество работ, отражающих главным образом общетеоретические вопросы и вопросы экспериментального исследования, то для процесса гибки прокаткой (в роликах) на момент начала цикла работ по данному направлению было характерно наличие весьма небольшого количества работ, носящих частный характер. При этом стояли вопросы как теоретического обоснования применяемых способов и приемов интенсификации процессов профилирования, их экспериментального изучения, так и вопросы разработки промышленной технологии стесненного изгиба и соответствующего оборудования.

При этом, наряду с оптимизацией схем и режимов формообразования, возникали проблемы правки профилей. Уменьшение количества переходов при стесненном изгибе приводит к значительным поводкам, устранение которых связано с большими затратами и требует специального оборудования. Например, правку прессованных профилей производят на крупногабаритных растяжных прессах большой мощности.

Значительные поводки профилей, получаемых стесненным изгибом, являются неустранимым браком. Поэтому наиболее эффективным является предупреждение поводок непосредственно в процессе формообразования профилей. На момент начала работы имелись лишь скудные данные по вопросам правки при формообразовании профилей в роликах. Проблема формообразования профиля с одновременной правкой практически не была затронута, в то время как задачи создания технологических процессов, в которых возможно управление очагом пластической деформации с целью предупреждения поводок или получения заданной кривизны, были достаточно актуальными.

В работе рассмотрены теоретические и практические вопросы разработки и внедрения технологии и оборудования для реализации процессов стесненного изгиба, совмещенных с правкой.

Авторы работы – кандидат и доктор технических наук, посвятившие более 25 лет вопросам разработки технологии интенсивных методов деформирования листовых заготовок, в том числе формообразованию профилей в роликах методом стесненного изгиба.

Книга написана с использованием результатов более 80 разработок, выполненных в ОАО «Ульяновский НИАТ» (Научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства), НИИ

«МИТОМ», УлГТУ и внедренных на 12 предприятиях авиационной отрасли, в рамках Целевой комплексной программы Министерства авиационной промышленности и корпорации «Росавиакосмос».

Из предприятий авиастроительного профиля – заказчиков технологии и оборудования – можно указать следующие: ММЗ им. С.В. Ильюшина, Ташкентское авиационно-промышленное объединение, Ферганский механический завод им. В.П. Чкалова, Саратовский авиационный завод, Смоленский авиационный завод, НПО «Молния», Киевское авиационное промышленное объединение, МАПО им. Дементьева, Луховицкий механический завод, Таганрогское авиационное промышленное объединение, Иркутское авиационное промышленное объединение, ЗАО «Авиакор-Лизинг», Воронежский завод «ВАСО».

Гнутые мелкосортные профили различных конфигураций из высокопрочных плакированных алюминиевых сплавов, изготовленных методом стесненного изгиба, применяются в качестве деталей стрингерного набора на летательных аппаратах: **ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70, АН-140, АН-148.**

Разработанная с участием авторов настоящей книги отраслевая нормативно-техническая документация в виде директивной технологии, технологических материалов, методических материалов на проектирование технологического оснащения и руководящий технический материал являются основными технологическими документами авиастроительной отрасли, в соответствии с которыми осуществляется производство гнутых профилей для указанных летательных аппаратов.

Авторы глубоко признательны учителю и коллеге к.т.н., доценту

Проскурякову Глебу Васильевичу и всем сотрудникам ОАО «Ульяновский

НИИТ» за помощь в процессе выполнения работы, в особенности:

- § старшему научному сотруднику Москвину Александру Степановичу,
- § ведущему инженеру-технологу Чебурахину Евгению Николаевичу,
- § главному технологу Лапшину Владимиру Ивановичу;
- § начальнику технологического отдела Графовой Эмме Николаевне,
- § ведущим конструкторам Мударисову Зарифулле Ханафиевичу, Шипунову Виктору Николаевичу, Антонову Владимиру Николаевичу;
- § инженерам-металловедам: Перязевой Татьяне Владимировне, Янкевич Татьяне Викторовне,
- § ведущему инженеру-патентоведу Смагиной Наталье Львовне.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ В АВИАСТРОЕНИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Применение гнутых профилей в авиастроении

В связи с расширением в последние годы парка летательных аппаратов, а также с производством все большего количества широкофюзеляжных самолетов особое значение приобретает использование таких конструкций для постройки планера летательного аппарата, которые бы позволили снизить ее массу и повысить ресурс [1 – 4].

В конструкциях самолетов крупнейших зарубежных фирм «Боинг», «Локхид», «Норд-Америкэн», «Дженерал – Дайнемикс» и др. широко применяются гнутые профили (табл. 1.1), удовлетворяющие требованиям эксплуатации широкофюзеляжных машин [5]. Номенклатура гнутых профилей, применяемых ведущими зарубежными авиакосмическими фирмами, включает в себя несколько сотен позиций [6]. Данные профили изготавливаются из листовых заготовок, толщина которых в основном находится в диапазоне 0,5 – 3,2 мм. Однако есть профили, имеющие как меньшую толщину до 0,3 мм, так и большую до 11,4 мм. При этом радиус зон сгиба основной массы профилей несколько больше или равен толщине заготовки. У некоторых профилей радиус зон сгиба достигает 5 толщин стенки. Изготовление профилей с радиусами зон сгиба, близкими к толщинам исходного материала, методами обычной гибки затруднено, так как материалом профилей указанных фирм обычно служит сплав с повышенными механическими свойствами, например, применяют литиевые сплавы, аналогичные сплаву 1420 и др.

В отечественном авиастроении используется также большое количество гнутых профилей (до 200 типоразмеров с характеристиками поперечных сечений, приведенных в табл. 1.2). Однако применение гнутых профилей в качестве стрингеров до недавнего времени считалось нецелесообразным, так как они уступают прессованным профилям в жесткости.

Одним из путей, позволяющим повысить эксплуатационные характеристики изделий отрасли, является широкое применение в конструкциях панелей и оболочек подкрепляющих элементов (профилей и гофр), изготовленных методом стесненного изгиба из листовых заготовок различных сплавов и композиционных материалов [7, 8, 9].

Предпринимались попытки внедрить гнутые профили на самолеты вертикального взлета Як-148 и самолет ТУ-204, АН-124, для чего были изготовлены методом стесненного изгиба опытные партии профилей и переданы на исследования и испытания в ВИАМ и ЦАГИ. Однако решение о постановке профилей на изделия принято не было, в основном, из-за необходимости существенного пересмотра конструкции самолетов, на которые к тому времени уже практически были готовы чертежи. Вопрос внедрения технологии стесненного изгиба положительно решился для изделия «114» – самолета ИЛ-114, разработанного ОКБ им С.В. Ильюшина, для которого

«основной особенностью конструкции фюзеляжа является применение катаных из листа алюминиевого сплава стрингеров и обводов шпангоутов, что позволяет повысить технологичность конструкции, увеличить ее коррозионную стойкость (за счет сохранения на катаных элементах плакированного слоя) и снизить массу – по сравнению с конструкцией, использующей прессованные профили» [10]. В указанном самолете стрингеры выполнены из листовых материалов Д16, 1163, В95 толщиной 0,8 – 1,5 мм. Действительно, в ряде конструкций можно успешно использовать тонкостенные профили, жесткость которых удовлетворяет требованиям конструктора, но получение которых прессованием представляет большую технологическую проблему в связи с низкой стойкостью матрицы. При изготовлении тонкостенных профилей прессованием происходит увеличение толщины элементов профиля по отношению к номинальным размерам до 20 % (рис. 1.1.) согласно работе [11]. К тому же наблюдается значительный разброс свойств материала по длине прессованного профиля в связи с колебаниями температурно-силовых параметров процесса. Поэтому структура начальной части получаемых профилей оказывается весьма рыхлой и ее приходится отрезать. Даже при хорошо налаженном производстве пресс-остаток составляет 10–15 % [12].

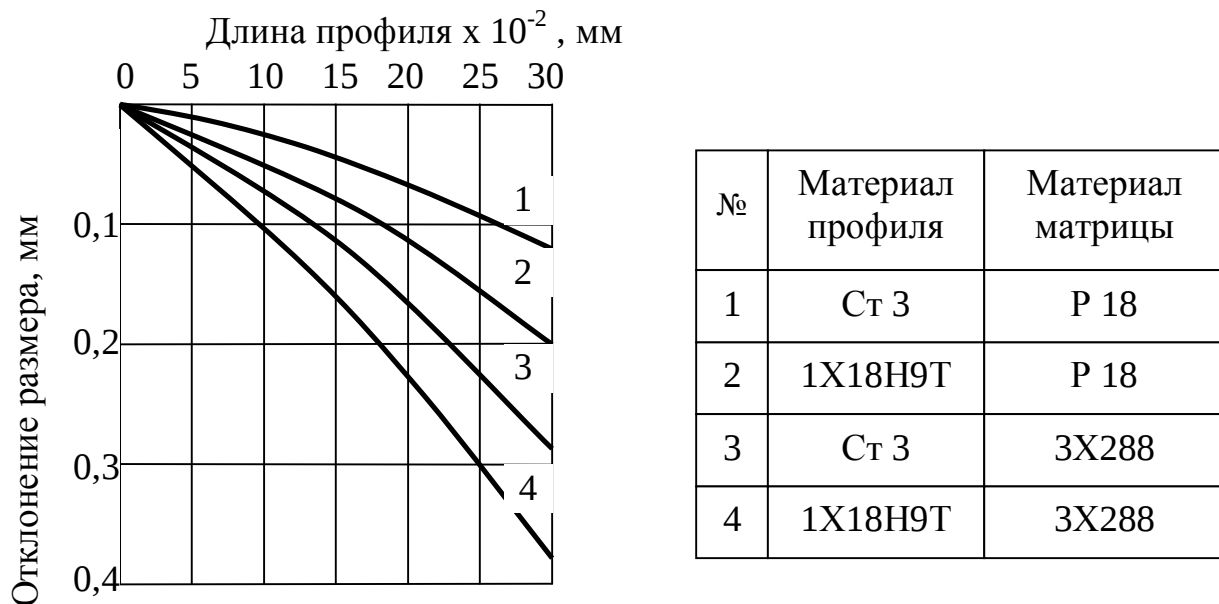


Рис. 1.1. Изменение размера сечения по длине прессованного профиля

Кроме того, прессованные профили оказываются коррозионно менее стойкими по отношению к листовым профилям [13], что существенно ограничивает их применение в высокоресурсных грузовых и пассажирских самолетах, где условия их работы из-за наличия фюзеляжного конденсата являются весьма тяжелыми [14, 15]. В этой связи листовые профили, получаемые гибкой, обладают существенными преимуществами перед прессованными профилями: повышенная коррозионная стойкость [12], хорошее качество поверхности, высокая точность размеров, относительная простота и

дешевизна изготовления [16]. Единственным недостатком таких профилей является их небольшая жесткость, связанная с большими радиусамигиба и утонением в зоне сгиба. Стесненный изгиб позволяет устранить эти недостатки и получать профили с малыми радиусамигиба и утолщением в зоне сгиба, которые обладают повышенной жесткостью по сравнению с профилями, полученными традиционными способами гибки [17]. На рис. 1.2. дается зависимость критических напряжений, при которых

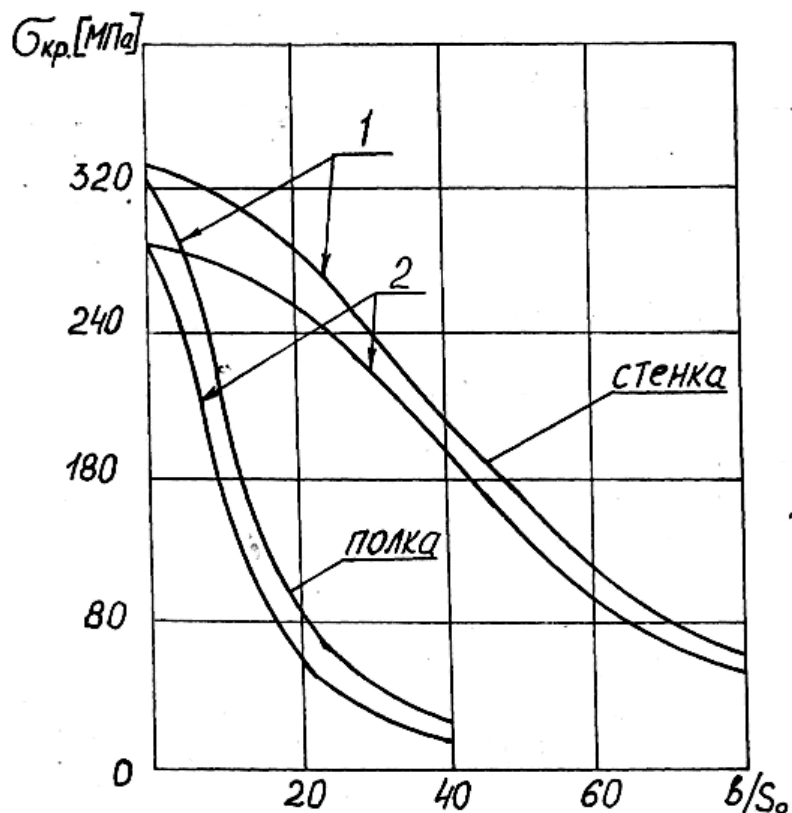


Рис. 1.2. Местная потеря устойчивости листовых профилей: 1-профиль, полученный стесненным изгибом; 2 – профиль, полученный обычной гибкой

наступает потеря устойчивости элементов Z-образных профилей, изготовленных из материала Д16Т стесненным изгибом и обычной гибкой, от геометрических параметров (b – длина конструктивного элемента, s_0 – толщина конструктивного элемента). Сравнение величин критических напряжений для профилей, изготовленных обычной гибкой и стесненным изгибом показывает, что профиль, изготовленный стесненным изгибом, допускает нагрузку на 10–12 % большую, чем профиль, изготовленный обычной гибкой. С развитием технологии получения новых авиационных материалов в нашей стране и за рубежом [18, 19, 20, 21, 22] профили, получаемые стесненным изгибом, могут находить все большее применение, ибо технологические возможности этого метода позволяют изготавливать профили заданных сечений из малопластичных материалов. Особое значение приобретают эти возможности для увеличения ресурса планера, поскольку конфигурация зоны сгиба определяет коэффициент концентрации напряжений [23] при воздействии на профиль внешних силовых факторов. Совершенствование планера летательного аппарата в значительной степени зависит от рационального сечения и формы и качества [24] его конструктивных элементов. Листовые профили меньшей площади поперечного сечения, изготовленные методом стесненного изгиба и используемые в конструкциях сжатонагруженных оболочек и панелей в качестве подкрепляющих элементов, позволяют облегчить конструкцию. Приближая форму поперечного сечения к идеальному

профилю замкнутого сечения – трубе, можно создать наиболее совершенную конструкцию минимальной массы [8]. Применение панелей с закрытыми профилями улучшает работу конструкции при возникновении предпосылок для крутильной формы потери устойчивости. Из рассмотрения вопроса применимости прессованных и листовых профилей следует, что профили, изготавливаемые методом стесненного изгиба, в ряде случаев являются хорошим компромиссом между прессованными и гнутыми обычной гибкой профилями. Применение таких профилей дает положительный эффект в сфере эксплуатации летательных аппаратов, а потому изыскание технологических решений по изготовлению таких профилей все еще остается весьма актуальным.

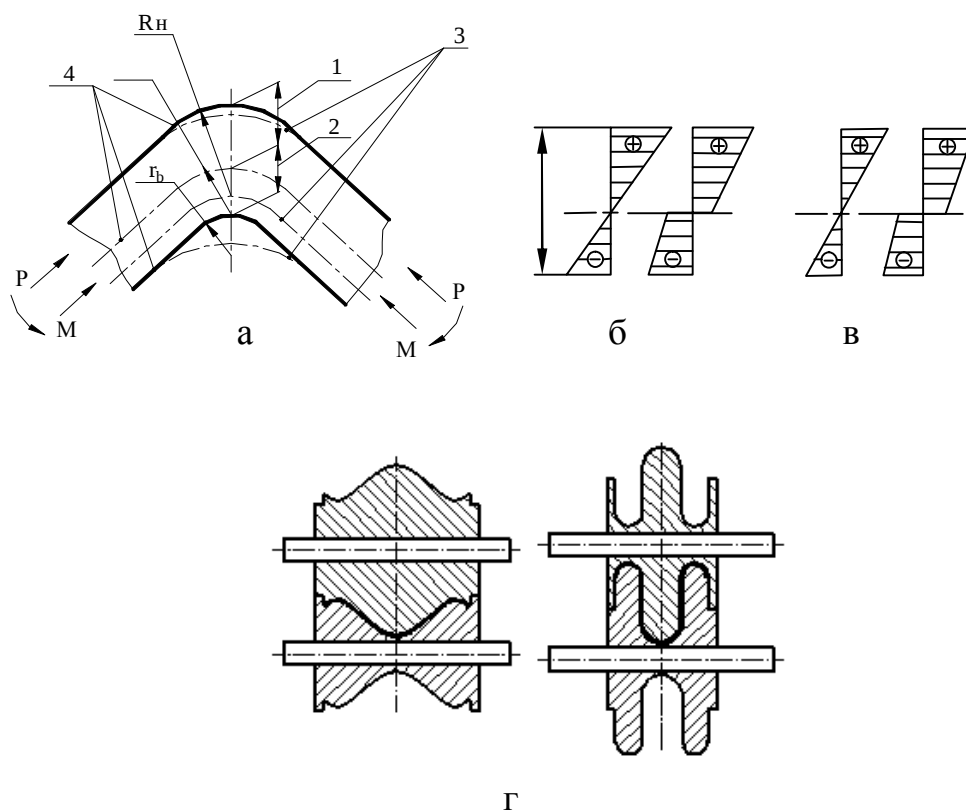


Рис. 1.3. Сущность метода стесненного изгиба: а – угловая зона и действующие силовые факторы при деформировании; б, в – эпюры деформаций и напряжений при обычной гибке и при стесненном изгибе соответственно; г – роликовый инструмент. 1, 2 – растянутая и сжатая зоны при стесненном изгибе; 3, 4 – наружный контур, внутренний контур, нейтральный слой при обычной гибке и при стесненном изгибе соответственно

Требование уменьшения относительного радиуса гибки и увеличения толщины в зоне сгиба для приближения сечения гнутого профиля к сечению прессованного привело к созданию Проскуряковым Г.В. нового метода [25, 26], устраняющего недостатки обычной гибки.

Как известно [27], получение малого радиуса гибки (особенно для малопластичных материалов) связано с рядом технологических проблем, возникающих из-за больших пластических деформаций наружного контура зоны сгиба, сопровождаемых утонением материала и приводящих к разрыву материала при достижении ими критических значений. Существуют вполне жесткие ограничения на минимально допустимый радиус гибки [28, 29].

Стесненный изгиб характеризуется тем, что процесс гибки ведут с приложением дополнительных сжимающих усилий, перпендикулярных оси гибки (т.е. в тангенциальном направлении). Это уменьшает деформацию наружного растянутого волокна, что и позволяет производить гибку листового материала с радиусом, значительно меньшим допустимого при обычной гибке [30, 9]. Кроме того, приложение достаточно больших сжимающих усилий увеличивает объем сжатой зоны, что приводит к смещению нейтрального слоя деформаций в сторону наружного контура, а также к увеличению толщины материала в зоне сгиба (рис. 1.3) [9, 31, 32, 33, 34].

Приложение дополнительных сжимающих усилий, позволяющих получить минимальные радиусы зон сгиба, не превосходящие толщину исходной заготовки, с одновременным утолщением зон сгиба, осуществляют за счет избыточной ширины исходной заготовки по сравнению с разверткой калибра формирующего инструмента окончательного перехода (рис. 1.3, г). Такая схема формообразования позволяет сместить нейтральный слой деформации к наружному контуру зоны сгиба и предотвратить разрушение крайнего наружного волокна, испытывающего максимальные растягивающие нагрузки.

1.2. Изготовление листовых профилей различными способами

Все способы гибки профилей стесненным изгибом можно отнести к основным четырем разновидностям (рис. 1.4): гибка на кромкогибочных машинах, гибка в штампах, гибка-волочение и гибка-прокатка (стесненный изгиб с приложением дополнительных сжимающих усилий в тангенциальном направлении в процессе деформирования).

В работах [7, 35, 8, 9] показано, что наиболее производительным и технологичным является процесс производства профилей на гибочно-прокатных станках. Однако до начала работы не существовало достаточно разработанных режимов формообразования профилей из листа методом стесненного изгиба, которые позволяли бы получать профили больших длин с поводками, не превышающими 1 мм/м в условиях заготовительно-штамповочного производства авиационных заводов.

Преимущества профилей, получаемых методом стесненного изгиба, и высокая технологичность их производства на гибочно – прокатных станках требовали разработки этого метода, основными преимуществами которого являются:

- повышенная жесткость поперечного сечения профилей по сравнению с профилями, изготавливаемыми обычной гибкой (за счет малого радиуса и утолщения зон сгиба [35, 36]);

- применение высокопрочных плакированных сплавов и конструкционных материалов в качестве исходных заготовок;
- высокая технологичность изготовления деталей и конструкций из данных профилей вследствие того, что гнутые профили имеют одинаковую толщину по сечению, закругления внешних углов, прямые кромки полок; они легко поддаются операциям подсечки, гибки, сварки, сборки и монтажа изделий;
- высокая производительность процесса профилирования;

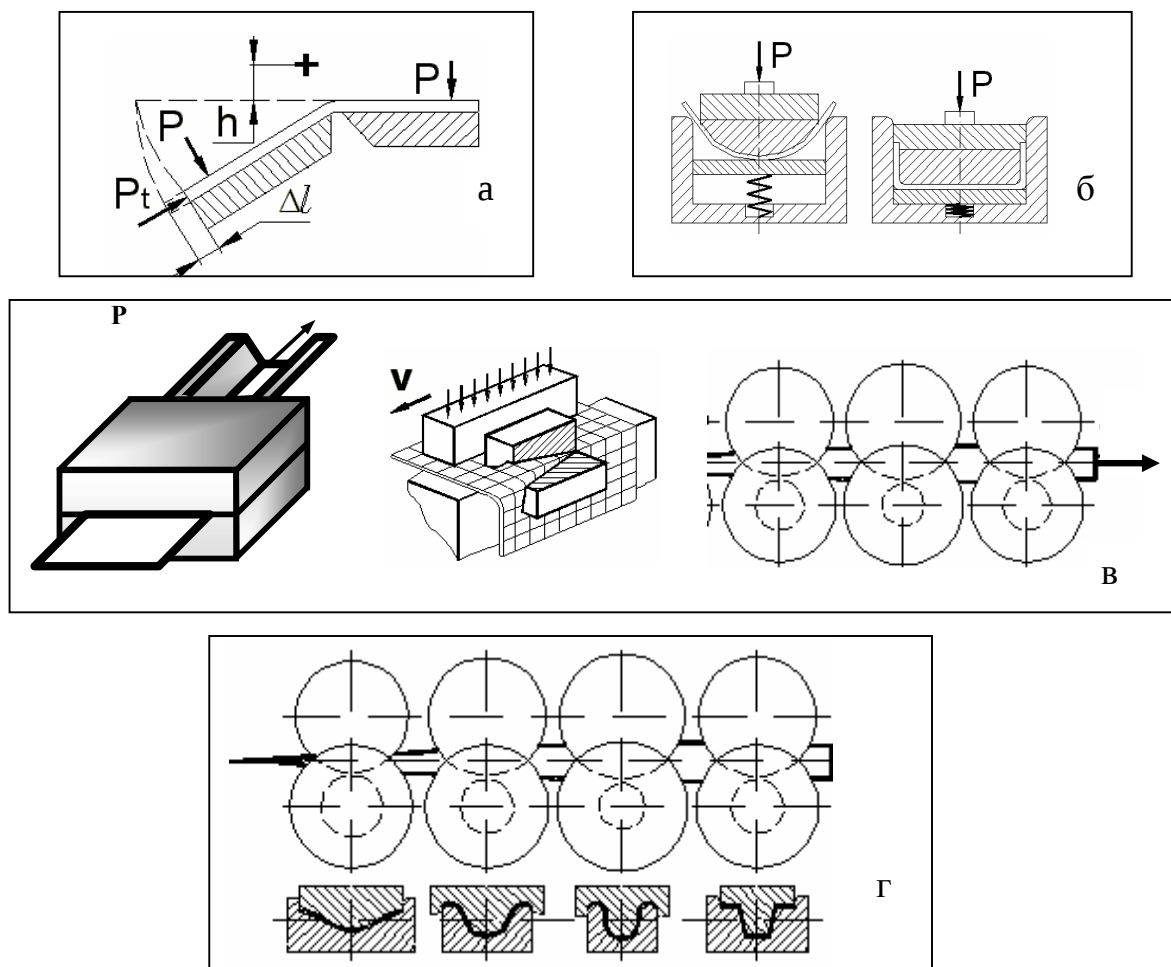


Рис. 1.4. Изготовление профилей из листа методом стесненного изгиба

- возможность получения профилей из ленты произвольной длины (более 8 м), что позволяет снизить количество стыков деталей в конструкции;
- высокий коэффициент использования исходного материала, достигающий 99% – 99,9% [37, 3].
- наклеп при холодном деформировании упрочняет материал и повышает предел текучести материала готовых профилей на 10 – 15% [37, 38];
- применение простого и дешевого в изготовлении оборудования и оснастки: изготовление оснастки (роликов, фильер) значительно проще и дешевле изготовления штампов для любых профилей.

Все эти и некоторые другие преимущества широко известны и подтверждены практикой [37, 16, 38].

1.2.1. Гибка в кромкогибочных устройствах

В кромкогибочных устройствах получение профилей из плоской заготовки связано с приложением изгибающего момента и сжимающей силы в процессе формообразования угла с малым относительным радиусом (рис.1.4, а). Приложение сжимающей силы происходит благодаря более короткой, чем при обычной гибке, траектории перемещения концевой части заготовки (рис. 1.5). Для уменьшения траектории движения торца заготовки на величину Δ в кромкогибочных устройствах, предназначенных для осуществления стесненного изгиба, смещают ось вращения поворотной части устройства в верхнюю полуплоскость относительно базовых поверхностей подвижного и неподвижного корпусов на расстояние h [25]. Технологический процесс изготовления заключается в подгибке концевой части заготовки или же посредством выполнения нескольких перегибов с перемещением заготовки в направлении, перпендикулярном линиигиба [39].

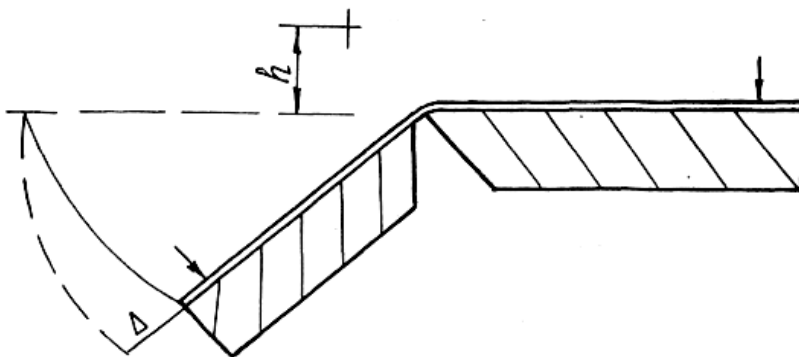


Рис. 1.5. Гибка в кромкогибочном устройстве

Кромкогибочные устройства для реализации стесненного изгиба хорошо себя зарекомендовали при изготовлении профилей небольшой длины из малопластичных и композиционных (дисперсно упрочненных) материалов [17]. Однако они не получили широкого распространения в самолетостроении из-за отсутствия их серийного изготовления и в связи с ограниченными технологическими возможностями (можно получать лишь уголкового, швеллерные и корытообразные без отбортовки профили небольшой длины с шириной полок и стенок, определяемыми размерами прижимных планок).

Для экспериментальных исследований кромкогибочное устройство является очень удобным ввиду того, что при одноугловой гибке оно позволяет изменять угол гибки и силу поджатия, определяющие геометрию зоны сгиба, а также в связи с тем, что при этом не требуется изготовление специальной оснастки как при изготовлении профилей в штампах. В то же время результаты исследования могут быть в известной степени распространены и на другие виды формообразования стесненным изгибом [17]. Кроме того, кромкогибочные устройства специальных конструкций (например, устройство, описанное в работе [40]) являются едва ли не единственным видом устройств, позволяющих производить гибку на малые радиусы (порядка одной-двух

толщин заготовки) композиционные листовые материалы (слоистые, армированные волокнами пластики и дисперсно упрочненные композиты) .

1.2.2. Изготовление профилей стесненным изгибом в штампах

Процесс изготовления профилей стесненным изгибом в штампах (рис. 1.4, б) к настоящему времени исследован достаточно хорошо. Отличительной чертой данного процесса является то, что он позволяет создавать в закрытом штампе большие сжимающие усилия, приводящие к утолщению в зоне сгиба и малому радиусу гибки [41]. Впрочем, получение радиусагиба меньше допустимого возможно в открытом штампе [42], где уменьшение деформаций растяжения наружного контура происходит за счет одновременного изгиба нескольких заготовок (рис. 1.6). При этом минимальный радиусгиба зависит от величины угла пуансона, количества заготовок (рис. 1.7) и размеров матрицы. В данном процессе наличие трения и обжима заготовок приводит к возникновению неравномерного распределения по толщине листа сил тангенциального сжатия. Разновидностью описанного способа гибки является гибка с радиальным противодавлением, где уменьшение деформаций наружного контура происходит за счет давления выталкивателя [42]. При этом, с увеличением противодавления предельный радиусгиба уменьшается. В работе [44] уменьшение радиусагиба достигается в два перехода за счет подгибки на первом переходе на угол больше требуемого с последующей разгибкой на втором переходе до величины заданного угла без приложения сжимающих усилий к торцам заготовки. Описанные процессы не позволяют получать утолщений в зоне сгиба, хотя предельно допустимый радиус при этом уменьшается. Аналогично последнему из описанных способов гибки, в работе [45] предлагается первоначально профилировать заготовку с углом и радиусом больше заданных, а затем производить ее разгибку с одновременным уменьшением радиуса за счет приложения дополнительных тангенциальных сил сжатия. При этом используется «обратная» схема гибки (рис. 1.8, а) в отличие от традиционной «прямой» схемы (рис. 1.8, б). Использование данного способа позволяет получать утолщение в зоне сгиба до 30–50 % в зависимости от свойств материала.

В способе, совмещающем в себе предварительное профилирование в роликах и осадку в штампе [46], с целью повышения качества профилей из малопластичных материалов за счет уменьшения их коробления предлагается осуществлять двусторонний продольный подпор посредством приложения дополнительных упругих усилий осадки в зонах, примыкающих с обеих сторон

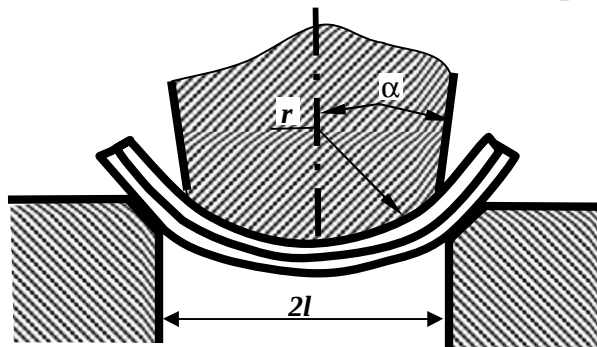


Рис. 1.6. Изгиб нескольких заготовок

к зоне окончательного формообразования, причем длина l_y каждой зоны определяется в соответствии с формулой:

$$l_y = \frac{b s_T (4S_0 + b)}{8S_0 s_y},$$

где b – ширина полки профиля; S_0 – толщина листа; σ_T – предел текучести; σ_y – предел упругости.

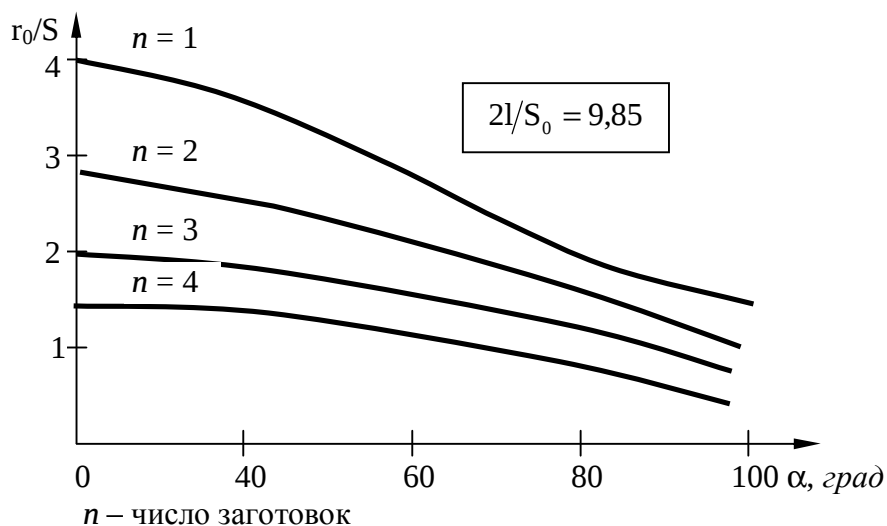


Рис. 1.7. Зависимость минимального радиуса от основных параметров

Формующие ролики образуют замкнутый фасонный ручей и посредством механизма шаговой подачи листовой заготовки передают последнюю в узел окончательного формообразования, выполненный в виде штампа с рабочими поверхностями по длине в местах формовки полок, состоящими из трех

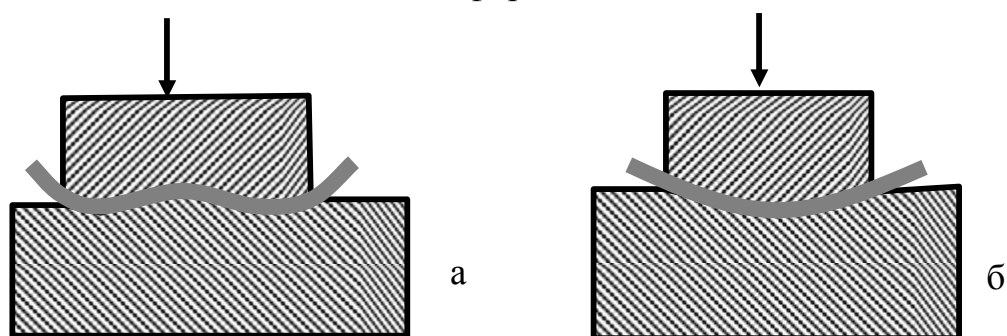


Рис. 1.8. Схемы формообразования в штампе: а – обратная; б – прямая

сопряженных между собой участков – плющения, осадки и калибровки; в местах расположения полок на участке осадки рабочие поверхности инструментов, формующие внешнюю сторону профиля, выполнены наклонными, а рабочие поверхности инструментов, формующие внутреннюю сторону профиля, в упомянутых местах выполнены горизонтальными по форме полок профиля.

Одним из недостатков данного способа является то, что по длине профиля могут появляться следы сдвиговых деформаций от наложения зон плющения, осадки и калибровки, что уменьшает ресурс изготовленных деталей.

К тому же изготовление роликов и штампов сложной конфигурации резко повышает стоимость изготовления профилей. Положительным в данном способе является то, что достигается высокая точность размеров, прямолинейность профиля. Для деталей, не требующих последующей термообработки, данный способ за счет пластической деформации может придавать значительное упрочнение поверхности, повышая эксплуатационные характеристики деталей.

В целом, изготовление профилей в штампах ограничивается невысоким качеством поверхности получаемых деталей, необходимостью изготовления дорогостоящей оснастки, что увеличивает сроки и усложняет подготовку производства, производительность при этом невысока.

1.2.3. Изготовление профилей гибкой-волочением

Формообразование профилей с утолщением зоны сгиба при малых относительных радиусах можно также производить путем протяжки листовой заготовки через инструментальную фильеру или ролики (рис.1.4, в).

Волочение через инструментальную фильеру обеспечивает последовательное свертывание листовой заготовки с одновременным приложением тангенциальных сил сжатия за счет избыточной ширины заготовки по отношению к размерам ручья фильеры [47]. Данная схема волочения позволяет получать зону сгиба с малым относительным радиусом и утолщением. Однако, при протягивании заготовки возникают настолько большие силы трения, что заготовка испытывает разрыв. Это особенно характерно для профилей более сложной формы, чем швеллер. Уменьшить силы трения можно посредством применения ультразвука [48] или же путем создания предварительной конфигурации заготовки с целью облегчения условий волочения. Так, в работе [49] для изготовления профилей из труднодеформируемых материалов заготовки изгибают предварительно в штампе, а затем при протягивании осаживают их полки, имеющие несколько большую высоту, чем высота проточки в верхнем вкладыше фильеры. Для предотвращения разрыва образца создавалось усилие подпора. Способ изготовления профилей протягиванием через инструментальную фильеру представляется мало перспективным в связи с невысоким качеством поверхности профилей, необходимостью изготовления сложных по исполнению фильер, обладающих низкой стойкостью, связанной со спецификой способа, заключающейся в возникновении больших контактных напряжений между заготовкой и фильерой. Последнее особенно характерно для процесса изготовления профилей из малопластичных листовых материалов. Даже применительно к обычной гибке (без утолщения в зоне сгиба с радиусом больше допустимого) данный способ характеризуется как малопроизводительный и устаревший [50].

Уменьшить силы трения в 5–6 раз при формообразовании можно путем замены инструментальной фильеры на роликую [8, 51, 52, 53].

Технологический процесс изготовления осуществляется путем получения предварительной конфигурации с большими радиусами, а затем производится осадка профиля в калибре стесненного изгиба, причем предварительную конфигурацию получают протягиванием заготовки усилием P_v в холостых роликах предварительных переходов (рис. 1.9).

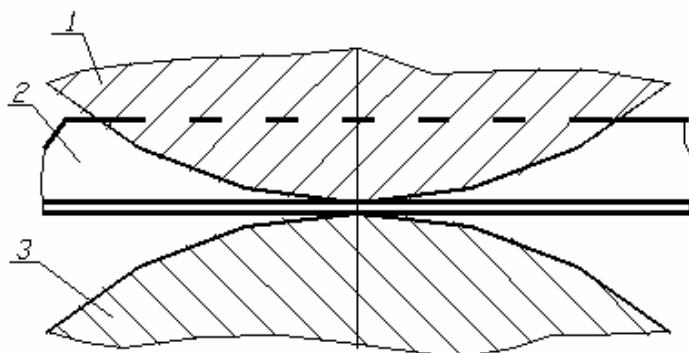


Рис. 1.9. Схема волочения в роликовой фильере: 1 – верхний ролик; 2 – профилированная заготовка; 3 – нижний ролик

Формообразование профилей в роликах волочением связано с трудностью задания заготовки из одной пары роликов в последующую, вследствие чего чистое волочение в роликах не используется. Сочетание различных вариантов изготовления профилей в роликах можно объединить общим названием: «гибка-прокатка», которая и рассматривается в следующем разделе.

1.3. Изготовление профилей гибкой-прокаткой

Гибка прокаткой (гибка в роликах) стесненным изгибом (рис. 1.4, г) осуществляется путем получения предварительной конфигурации профиля с радиусами больше заданных, а затем, при прохождении через калибр окончательного формообразования формируется малый радиус и утолщение в зоне сгиба [54]. При этом сжимающие усилия возникают лишь в случае, если ширина заготовки превышает ширину развертки окончательного сечения профиля. Осадка криволинейных участков заготовки, прилегающих к угламгиба, создает дополнительные сжимающие усилия, позволяющие осуществить набор утолщения с одновременным увеличением кривизны внутреннего контура зоны сгиба. От обыкновенного профилирования данный процесс отличается тем, что формообразующие ролики образуют замкнутый калибр, где заготовка перемещается за счет полезных сил трения, причем собственно стесненный изгиб (осадка) осуществляется в паре роликов окончательного формообразования. Этот окончательный этап представляется значительным

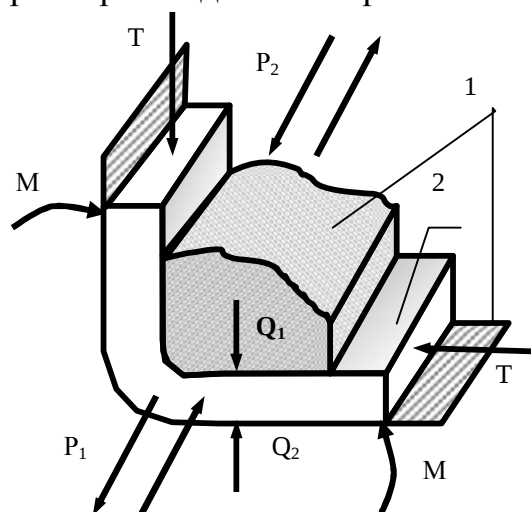


Рис. 1.10. Схемы приложения сил к заготовке: 1 – формующий инструмент; 2 – заготовка

числом вариантов его реализации, исходя из схемы приложения нагрузок (рис. 1.10).

Отметим прежде всего, что влияние радиальных нагрузок на характеристики зоны сгиба практически не изучено. Что касается различных сочетаний аксиальных нагрузок, то существует работа [55], которая показывает изменение геометрических параметров профиля в зависимости от величины и знака аксиальной нагрузки. На рис. 1.11 представлена зависимость относительного предельного радиуса r/s_0 от величины относительной осевой силы $\bar{P} = P_a / s_T$ для гибки листов из материала Д16АТ, откуда видно, что увеличение аксиального усилия приводит к уменьшению допустимого радиуса гибки.

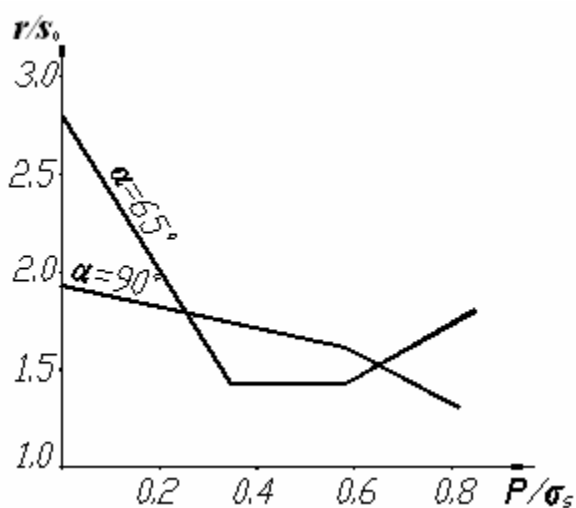


Рис. 1.11. Зависимость относительного радиусагиба от относительной осевой силы

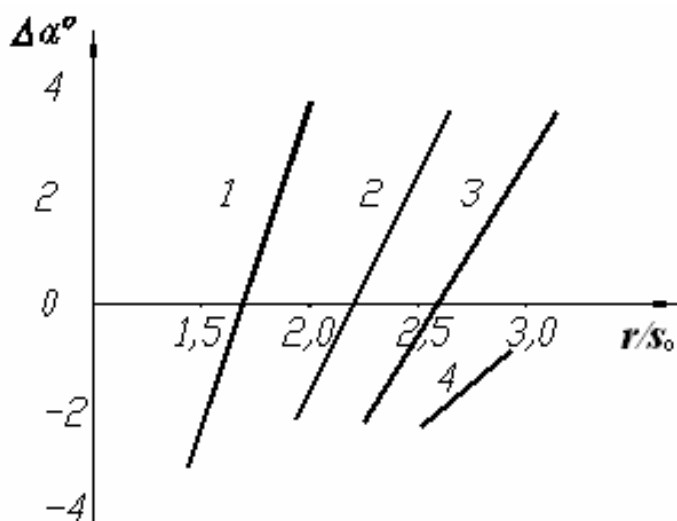


Рис. 1.12. Зависимость пружинения от относительного радиуса: 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям относительного сжатия, равным 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 соответственно

Следует также отметить, что величина аксиальных усилий влияет и на пружинение (рис. 1.12). Что касается знака приложенных осевых усилий, то их влияние на предельный радиус гибки не дает симметричной картины. В указанной работе исследованы три схемы гибки без сжимающих тангенциальных усилий: изгиб с одновременным приложением аксиальных усилий сжатия (растяжения); предварительное аксиальное сжатие (растяжение) листа с последующей гибкой; изгиб с последующим аксиальным сжатием (растяжением) листа. Рис. 1.13 дает представление о влиянии каждой из схем на предельно допустимый радиус, откуда видно, что из двух схем ($P + И$, $С + И$), которые реализуются при гибке прокаткой, наиболее эффективной схемой является вторая.

В этой связи наиболее перспективной в плане интенсификации процесса является схема с двусторонним сжатием с возможными сочетаниями радиальных сил обжима зоны сгиба.

Изготовлению профилей из титановых сплавов стесненным изгибом в роликах посвящены работы [34, 56, 57], в которых рассмотрены особенности изготовления тонкостенных профилей. При этом процесс интенсифицируется за счет нагрева заготовки [57]. В работах [58, 59, 7] рассмотрены возможные схемы и пути формообразования профилей из алюминиевых и магниевых сплавов, где выявляются факторы, определяющие качество получаемых профилей. Процессы осадки уголкового заготовки и заготовки швеллерного типа рассмотрены в статьях [60, 61]. При этом выявляются режимы формообразования на окончательной стадии процесса.

К сожалению, перечисленные выше работы носят характер экспериментального решения частных технологических проблем. Действительно, создание технологии изготовления профилей определенного типа требует и некоторой степени обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований для приближения процессов проектирования к формализованной процедуре задания параметров технологической оснастки. Возможность такого обобщения следует из повторяемости закономерностей при изготовлении профилей из металлической ленты [62].

Анализ опыта проведения экспериментальных работ и литературных источников по технологии стесненного изгиба позволяет выявить причины появления дефектов профилей, которые сведены в табл. 1.3 [5]. Прогиб в вертикальной плоскости характерен для стесненного изгиба вследствие несбалансированности силовых факторов при осадке волнообразной заготовки. В отсутствие правильного устройства этот вид дефекта фактически не поддается полному устранению ни выбором схем формообразования, ни выбором соотношения катающих диаметров формирующих роликов. Для устранения данного дефекта необходимым является изучение количественных соотношений между технологическими параметрами процесса и кривизной получаемого профиля. Следует предложить такую конструкцию правильного устройства, которая могла бы устранять не только продольную кривизну профиля в вертикальной плоскости, но и в горизонтальной плоскости, а также убирать скрутку. Вместе с тем, влияние схем формообразования (фактически, конфигурация рабочих калибров роликов) может оказаться значительным для уменьшения поводов.

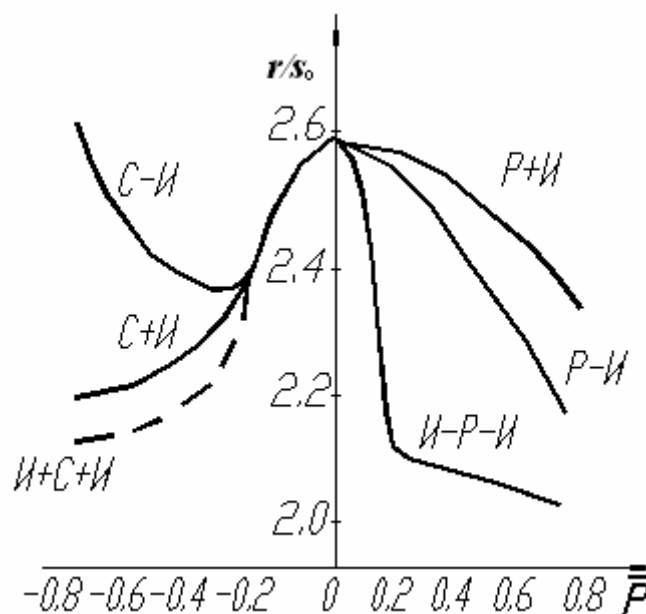


Рис. 1.13. Зависимость относительного радиусагиба от относительной аксиальной силы при различных схемах нагружения: **p** – растяжение; **и** – изгиб; **с** – сжатие

Таблица 1.3.

Причины появления дефектов профилей при формообразовании их стесненным изгибом на гибочно-прокатных станках

№№ пп	Вид дефекта профиля	Возможные дефекты появления
1	Прогиб в вертикальной плоскости	а) смещение оси профилирования по вертикали
		б) неправильно выбран зазор в роликах
		в) ошибка в выборе ширины заготовки
		г) смещено правильное устройство
2	Прогиб в горизонтальной плоскости	а) смещение оси профилирования по горизонтали
		б) перекося роликов
		г) ошибка в проектировании предварительного перехода
		д) саблевидность исходной заготовки более 3 мм/м
3	Структура	а) перекося установки роликов окончательного и предварительных переходов
		б) смещение оси профилирования
		в) ошибочная (несимметричная) схема формовки
		г) перекося роликов окончательного перехода
		д) отклонение ширины исходной заготовки более $\pm 0,5$ мм или саблевидность заготовки более 3 мм/м
		е) смещено правильное устройство
4	Кромковая волнистость	а) ошибочная схема формовки
		б) неправильно выбрано соотношение диаметров роликов по переходам
		в) избыточная ширина заготовки
5	Неудовлетворительное качество поверхности	а) отсутствие смазки
		б) ошибочная схема формовки
		в) неудовлетворительное качество инструмента
6	Недоформовка, разрушение наружного контура зоны сгиба	а) уменьшенная ширина заготовки
		б) увеличенный зазор в контуре окончательного перехода
7	Гофры на внутренней поверхности зоны сгиба	а) увеличенная ширина заготовки
		б) неудовлетворительное качество инструмента
8	Разнотолщинность по сечению профиля	а) перекося роликов

Для формулировки общих методологических принципов проектирования оснастки следует провести количественный анализ параметров процесса и характеристик получаемых деталей. При этом надлежит уделить специальное

внимание вопросам изготовления профилей несимметричного сечения; в литературе они освещены совершенно недостаточно.

1.4. Профилировочное оборудование для стесненного изгиба

Технология изготовления профилей стесненным изгибом в роликах подлежит реализации на специализированном оборудовании. Следует заметить, что применение такого оборудования дает ряд преимуществ по сравнению с использованием прессового оборудования [38]:

- возможность изготовления профилей минимальной толщины самых разнообразных конфигураций;
- получение профиля, позволяющего заменить сочетание нескольких профилей в конструкциях;
- незначительные отходы металла;
- приспосабливаемость к материалам;
- хорошее качество поверхности профиля;
- возможность изготовления профилей из заготовок с покрытием;
- высокая точность размеров профилей;
- сравнительно высокая производительность труда;
- возможность механизации и автоматизации производства;
- приспосабливаемость к масштабам производства;
- высокая стойкость инструмента;
- возможность совмещения профилирования с другими производственными процессами.

Используемое в настоящее время оборудование для профилирования за рубежом отличается тем, что оно ориентировано на серийное производство, является громоздким и содержит большое число профилирующих клеток (как правило, не менее шести [63]).

Западногерманская фирма «Дрейсштерн» производит 18 видов машин для профилирования с числом клеток от семи до двадцати, в которых можно осуществлять прокатку ленты толщиной от 0,5 до 8 мм [64]. Примерно такие же характеристики имеют профилегибочные машины фирм «Даниэл Смит» (Великобритания), «Вост-Альпине» (Австрия) [64], «Ван-Оттерлоо» (Нидерланды) [65]. Установка «Фагор» испанской фирмы «Аппасате» [66] содержит 12 формующих клеток и позволяет изменять скорость профилирования в пределах от 0 до 100 м/мин.

Отечественные профилегибочные станы, используемые в металлургической промышленности (табл. 1.4) [67], мало пригодны для авиастроения, где требуются частые переналадки, связанные с малой серийностью изделий, приводящие к большим трудозатратам из-за большого количества клеток. Кроме того, изготовление значительного числа пар роликов (как видно из табл. 1.4, не менее восьми) повышает стоимость изготовления оснастки. К тому же, эти станы требуют больших производственных площадей для их размещения и являются энергоемкими. В качестве примера скажем, что

агрегат 3.75.37 профилирования холодногнутых профилей (разработчик – УкрНИИМет) имеет ширину валков 100 мм, число клетей – 10, габаритные размеры 4000х1140х2680 мм, массу 2600 кг. Это, пожалуй, самый компактный из агрегатов такого типа.

Таблица 1.4

Промышленные профилегибочные станы

Тип стана	Размер заготовки, мм	Число клетей	Производительность, т/час	Скорость профилирования, м/мин
Легкий	0,2–1,2х15–150	8	1,5	30
Средний	1,0–8,0х50–600	24	7–65	30–150
Тяжелый	1,0–20,0х400–2000	20	70	30–180

Специализированная шестиклетьевая установка ВПУ–120/7,0 [68] для реализации стесненного изгиба, созданная профессором Колгановым И.М., обладала ограниченными возможностями, поскольку ширина заготовки не должна была превышать 100 мм. Масса станка 2500 кг. Изготовлен лишь один образец такой установки. Использование стесненного изгиба позволяет уменьшить число переходов до двух-четырех и использовать для формообразования специальные, например, четырехклетьевые гибочно-прокатные станки, отличающиеся от известных профилировочных станков компактностью и малым энергопотреблением.

При создании специализированного оборудования под определенную номенклатуру профилей, изготавливаемых стесненным изгибом, необходимо было определить энерго-силовые параметры (поскольку схема формовки осадкой по своим характеристикам существенно отличается от процесса традиционного профилирования) и межклетьевое расстояние, позволяющие минимизировать массу и габариты такого оборудования. Кроме того, следует обеспечить условия для задания заготовки в ролики и приема профиля по выходу его из последней пары, обеспечивая при этом его прямолинейность.

1.5. Дефекты профилей и правка, совмещенная с формообразованием

Тонкостенные профили формообразованные гибкой прокаткой, волочением штамповкой, прессованием и другими способами обработки металлов давлением могут иметь дефекты, связанные с нарушением заданных форм и размеров, такие как:

- отклонение от требуемой формы поперечного сечения;
- искажения по длине.

Отклонения от заданной формы поперечного сечения профилей заключаются в отклонения угла подгибки полок, разности в толщине полок, искрив-

ленности стенок и полок, в наличии заусенцев на кромках и неправильном сопряжении полок и стенок переменным радиусом (рис. 1.14).

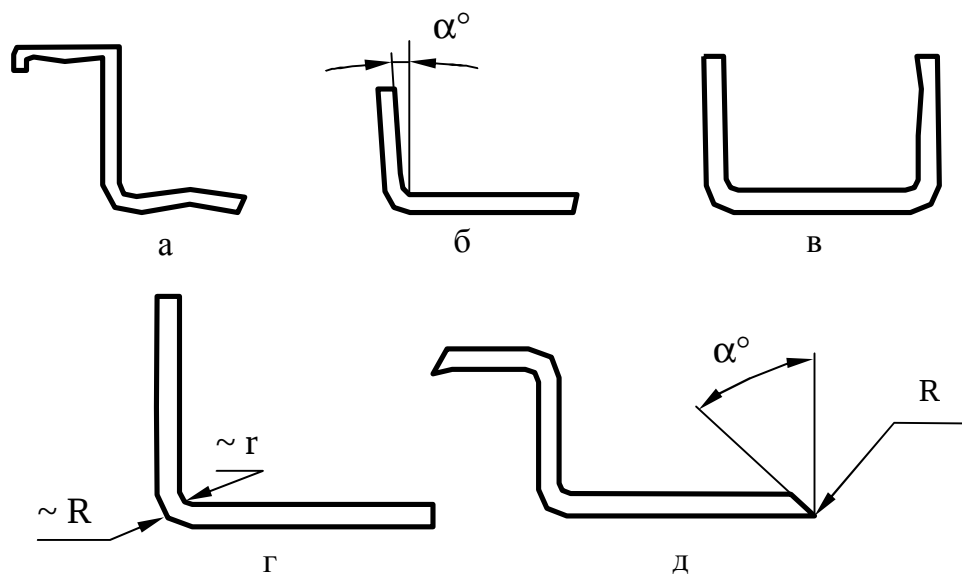


Рис. 1.14. Дефекты поперечного сечения гнутых профилей: а – прогиб полок; б – отклонение угла от заданного; в – волнистость полок; г – сопряжение полок переменным радиусом; д – утяжка кромок

К искажениям по длине относят все виды отклонений от прямолинейности в продольном направлении.

Искажения в горизонтальной плоскости принято называть саблевидностью [69, 70], в вертикальной плоскости – прогибом [70] (рис. 1.15).

Угловой поворот поперечных сечений, последовательно расположенных в продольном направлении – называют скрученностью [70].

Как правило, правка обычно связана с устранением нескольких видов поводок одновременно.

Гнутые профили, изготавливаемые обычной гибкой на профилировочных станках [16, 38], вследствие малых степеней деформации, обеспечиваемых большим количеством переходов, обычно не требуют последующей правки, так как при качественной настройке стана могут быть устранены изгибы получаемых профилей в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также скручивание их [37, 16, 38].

Поводки профилей, изготавливаемых методом стесненного изгиба при

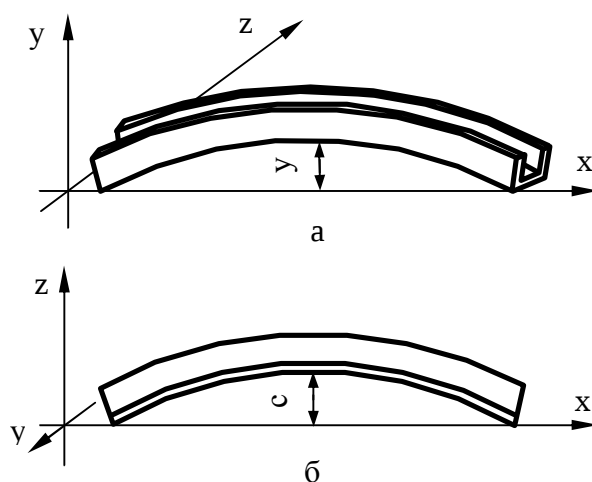


Рис. 1.15. Поводки профилей: а – прогиб Y; б – саблевидность C

прокатке в роликах, predeterminedены самими технологическими особенностями метода, такими как:

- одновременное формообразование в заготовке нескольких зон сгиба с большими относительными радиусами и подгибкой полок за один переход на угол 90° в одной паре роликов [36, 9];
- малое общее количество переходов гибки (не превышающее четырех) [8, 9] и, как следствие, значительные степени деформации заготовки на пути её формообразования от плоского листа до готового профиля;
- осуществление стесненного изгиба с большими степенями деформации, как правило, в последней паре роликов с замкнутым рабочим контуром за счет осадки цилиндрической поверхности заготовки с неравномерной деформацией её по периметру поперечного сечения и в аксиальном направлении;
- превышение ширины развертки предварительно сформованной заготовки над шириной развертки замкнутого рабочего контура роликов окончательного перехода ещё более повышает степень деформации;
- при прокатке в роликах окончательного перехода, напряжения не одинаковы по сечению и достигают предела текучести для данного материала, что доказывает появление утолщений в зонах сгиба и увеличение длины профиля по сравнению с исходной заготовкой.

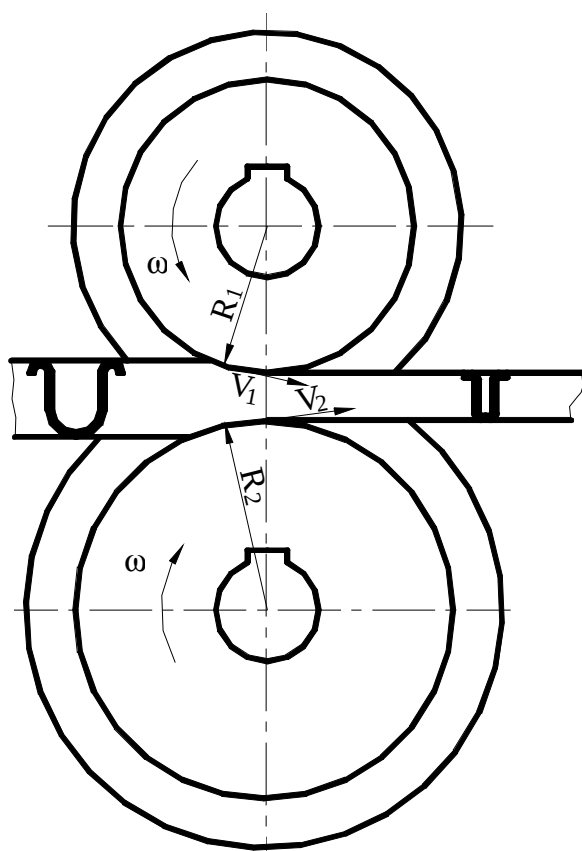


Рис. 1.16. Различие линейных скоростей формирующих поверхностей верхнего и нижнего роликов

Поэтому участок заготовки, проходящий через роликовый калибр стесненного изгиба, находится в состоянии, так называемого пластического шарнира [71, 72]. Причем, вследствие всегда присутствующих отклонений параметров процесса, таких как различная толщина и ширина исходной заготовки, неравномерность зазоров в формирующем калибре, различных условий смазки, точности настройки, состояние очага деформации является дополнительно нестабильным.

Это подтверждается тем, что при однозначной жесткой настройке гибочно – прокатного станка получаемые методом стесненного изгиба профили могут иметь поводки – различные по величине и даже по знаку. Различные виды поволодок могут наблюдаться даже в пределах мерной длины одного и того же

профиля. Частично поводки могут иметь место из-за различия линейных скоростей по высоте формующего роликового калибра при плотном контакте его с деформируемыми участками заготовки, при этом линейные скорости формующих участков верхнего и нижнего роликов могут отличаться как по величине так и по направлению (рис. 1.16). Ввиду того, что по конструктивным соображениям готовый профиль, как правило, имеет неодинаковые по величине верхние и нижние полки, при осадке предварительно сформованных участков заготовки верхним и нижним роликами окончательного перехода неизбежны различные величины работ деформирования и, соответственно, различные величины аксиальных деформаций верхних и нижних полок, что ведёт к прогибу профилей. Следует отметить, что при формообразовании профилей методом стесненного изгиба, они почти во всех случаях имеют и прогиб, и саблевидность, и скрученность.

Поводки могут возникать также вследствие ошибок в разработке оснастки и настройке станка, что хорошо видно из приведенной выше табл. 1.3.

Анализируя существующие процессы правки профилей [69, 70, 38] на базе проведенного патентного, литературного поиска и изучения современного производства, можно сделать вывод, что в настоящее время проблема получения высококачественной продукции решается путем создания совершенных правильных машин, исправляющих имеющиеся поводки, и средств предупреждения дефектов непосредственно при формообразовании, максимально устраняющих причины их возникновения.

Представленные в работах [69, 70] существующие правильные машины можно подразделить на 5 основных групп:

1) машины для правки изгибом; 2) правильно – растяжные машины; 3) раскруточные машины; 4) универсальные машины; 5) специальные машины.

Машины для правки изгибом представляют собой различного вида сортоправильные прессы и многороликовые машины, предназначенные для правки всех видов поводок (рис. 1.17).

Процесс исправления поводок профилей, полученных методом стесненного изгиба, на сортоправильном прессе имел бы низкую производительность, высокую стоимость оснастки, трудоемкость настройки и невысокое качество правки, а применение многороликовых машин, требующих трудоемкой настройки, привело бы к снижению запаса пластичности материала профиля или его разрушению вследствие значительных знакопеременных деформаций.

Значительное упрочнение (нагартовка) при правке потребует релаксирующей термообработки, которая в свою очередь приведёт к новым поводкам, подлежащим устранению.

Правильное оборудование со значительным числом роликов под каждый типоразмер профиля [69, 70] требует изготовления и хранения большого количества специальной оснастки. Кроме того, стоимость этих видов оборудования сравнима со стоимостью самого гибочно – прокатного станка для изготовления профилей стесненным изгибом.

Правильно – растяжные машины предназначены для правки изделий, имеющих продольные поводки, саблевидность, прогиб, скрученность.

Машины подразделяют на три группы:

- для правки простым растяжением;
- растяжением с нагревом;
- растяжением с раскручиванием.

Правильно – растяжные машины, кроме выполнения традиционных операций правки, иногда используют и для окончательной отделки профилей, формообразованных методом стесненного изгиба.

Однако известно, что у профилей, подлежащих правке растяжением, радиус наибольшей устраняемой кривизны составляет $R_0 > (25 - 50)H$, где H – высота поперечного сечения профиля, при растяжении на $(2 - 4,5) \%$ [69]. Для гнутых профилей из основных типовых авиационных материалов на алюминиевой основе (Д16, В95, АМГ6, 1420) величина правки растяжением ограничена $(1 - 2) \%$, поэтому радиус наибольшей устраняемой кривизны составит величину $R > 5H$, что соответствует при высотах поперечного сечения профилей 15 – 35 мм прогибу (саблевидности) 5,0 – 15,0 мм/м.

Следует также учесть, что зачастую на профиле имеется не один, а несколько видов поволоки, так что их комбинация еще более снижает максимальный прогиб, устраняемый растяжением.

Правка растяжением сопряжена с наличием отхода концевых частей профиля (до 300 мм). Как показывает практика, для высококачественной правки растяжением, с учетом всех ограничений, исправляемые поводки не должны превосходить величины $(3,0 - 5,0)$ мм/м.

Однако часто тонколистовые профили, формируемые методом стесненного изгиба, имеют более значительные поводки. Кроме высокой трудоемкости правки растяжением, этот процесс сложно применять в поточных и автоматизированных линиях по изготовлению профилей. Задачи получения методом стесненного изгиба на станках типа ГПС – 200 профилей без поволоки или с поводками, устраняемыми растяжением, продолжительное время оставались актуальными.

Следующие три группы сортоправильных машин – **раскруточные, универсальные и специальные** предназначены для правки больших партий профилей одного типа размера методом приложения многократных знакопеременных пластических деформаций. Они достаточно сложны по устройству, наладке и требуют значительного количества специализированной оснастки. Стоимость их сравнительно велика, а габариты значительно превосходят размеры гибочно – прокатного станка.

Вследствие этого, применение их для правки тонколистовых профилей, изготавливаемых методом стесненного изгиба, нецелесообразно. На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что из существующего арсенала средств для правки профилей, изготавливаемых методом естественного изгиба, целесообразно использовать правильно – растяжные машины в качестве оборудования окончательной отделки профилей.

Необходимо отметить, что для предупреждения появления дефектов формы при профилировании, прессовании, волочении и прокатке совместно с основными формообразующими операциями выполняют операции правки. Так, например, при прокатке металла используется дробная прокатка с минимальными степенями деформации на чистовых операциях [37]. Однако, этот способ при малом числе формообразующих клетей гибочно – прокатного станка стесненного изгиба неприемлем.

Достаточно широко используются автоматизированные системы контроля и регулирования положения профиля и его формы в процессе формообразования. Используется способ предупреждения поводов профилей, сочетающий процесс профилирования с волочением [8, 9].

Участок сформированного профиля, выходящий из последней пары форм валков гибочно-прокатного станка, попадает в зажим растяжного устройства, которое сообщает формирующемуся профилю усилия правки. Такой способ может использоваться как на протяжении всего процесса профилирования, так и во время его завершения, когда концевая часть заготовки находится в отключённых от привода формообразующих роликах [8]. Более подробно процессы, происходящие при сочетании гибки – прокатки с волочением, рассмотрены в работе [8].

В литературе описаны способы создания многократных знакопеременных нагрузок изгиба при волочении с целью предотвращения искривления профилей. Предупреждения поводов добиваются также путем высокой точности настройки гибочно – прокатного станка [37, 16, 38]; смещением оси профилирования [37, 16, 38]; заданным расположением роликов в клетях и самих клетей между собой; установкой специальных правильных клетей на гибочно – прокатном станке.

Предупреждение поводов при помощи правильных устройств, расположенных непосредственно на гибочно – прокатном станке, распространено достаточно широко. Причем специальные устройства, предупреждающие поводки, содержат различные формообразующие агрегаты: металлургические прокатные станы; установки для прессования и др.

Лучшими по конструкции, по мнению И. С. Тришевского [38], правильными устройствами гибочно – прокатного станка являются механизмы, которые состоят из станины и смонтированных в нее на установочных плитах двух кассет с четырьмя правильными роликами в каждой. Установочные плиты с роликами имеют возможность перемещения в пределах регулировок в горизонтальной и вертикальной плоскости и по углу. Каждый из блоков дополнительно несет регулировку в радиальном направлении. Такая конструкция позволяет исправить прогиб, саблевидность и скрученность профилей путем смещения правильных роликов в необходимое положение.

Правильные устройства аналогичных конструкций содержат и зарубежные профилегибочные линии. Конструкция правильного устройства профилегибочной линии 4 MIS – 10 японской фирмы НАКАТА [73] состоит из массивной станины 1 (рис. 1.18), на которой симметрично размещены две плиты 2,

имеющие регулировку в вертикальной плоскости посредством болтов 8, независимо друг от друга. Каждая из плит 2 несет в себе плиту 3, имеющую регулировку в горизонтальной плоскости посредством болтов 9. В свою очередь, каждая из плит 3 содержит обойму 4, имеющую возможность поворота относительно оси правки на угол $\pm 45^\circ$. Эта регулировка осуществляется за счет зубчатого сектора 6 и червяка 7, также имеющих на обеих обоймах 4.

На обоймах 4, на осях 5 закрепляются роликовые калибры, состоящие из 2-х или одной пары роликов каждый.

Таким образом, устройство позволяет осуществить правку профилей изгибом посредством смещения одного роликового калибра относительно другого и относительно оси прокатки в любое необходимое положение, в пределах регулировок.

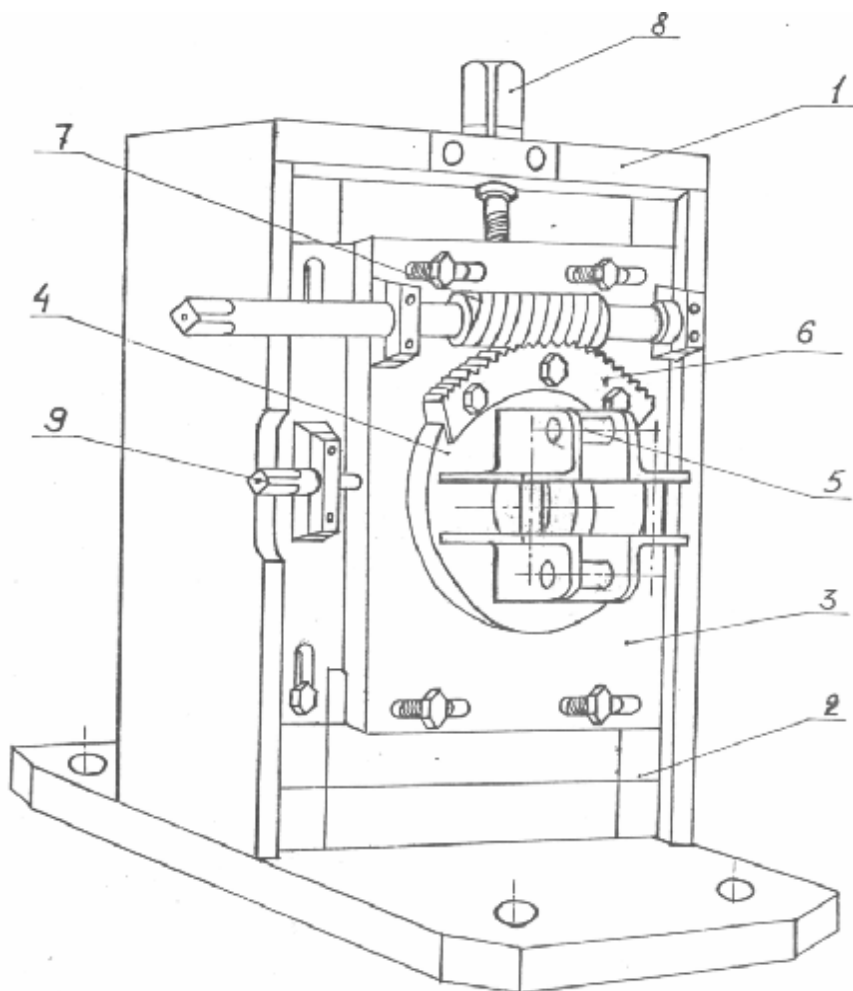


Рис. 1.18. Правильное устройство японской фирмы НАКАТА

Устройство может работать с одним роликовым калибром. При этом станины 1 снимается одна из плит 2, несущая на себе все узлы. Оставшаяся на станине 1 другая плита 2, имеющая роликовый калибр, может выполнять функции правильно-направляющего устройства гибочно-прокатного стана. Правка в этом случае также будет производиться изгибом относительно последней пары формообразующих валков гибочно – прокатного стана.

Известны и отечественные аналоги такого типа устройств [74, 38]. Недостатками таких устройств являются:

- необходимость сложной, трудоемкой настройки при высокой квалификации наладчика;
- вследствие жесткой установки правильного блока, процесс правки не учитывает изменения текущих параметров формообразования;
- низкое качество правки при формообразовании профилей методом стесненного изгиба.

Кроме того, в таких конструкциях, рассчитанных на работу в агрегатах традиционного профилирования (обычной гибки), где поводки профилей незначительны, не решены вопросы обеспечения гарантированного попадания профиля в правильный блок. При формообразовании профиля методом стесненного изгиба профиль, выходя по пространственной кривой из последней пары формообразующих валков, часто не попадает в правильный блок.

Заслуживает внимания конструкция правильного устройства, описанного в патенте США [75], схема которого представлена на рис. 1.19. На станине 1 жестко закреплена цилиндрическая обойма 2, в отверстии которой размещен корпус 3, подпружиненный относительно обоймы 2 пружиной 4. Корпус жестко соединен с направляющим калибром 5.

Устройство работает следующим образом. В начальный момент времени пружина 4 удерживает калибр 5 в непосредственной близости от формирующих роликов 6. При выходе трубы (прутка) из роликов 6, она принудительно попадает в калибр 5 и, затем, имеет возможность смещения калибра вдоль оси прокатки.

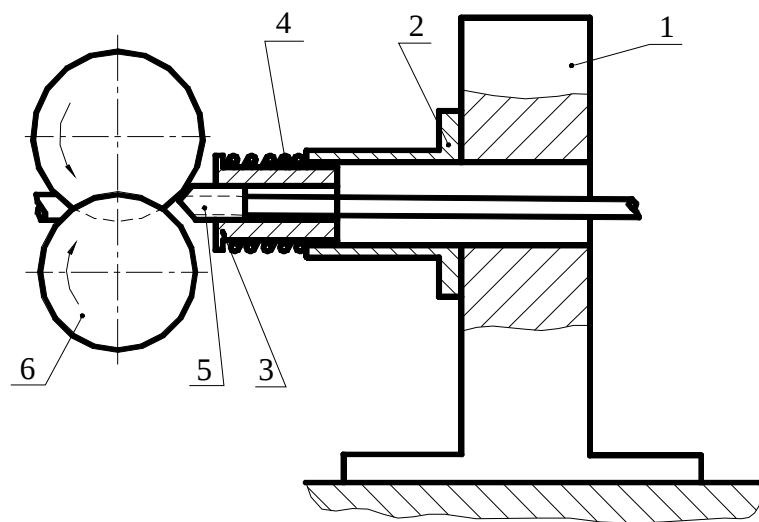


Рис. 1.19. Правильное устройство по патенту США 3501937

Таким образом, данное устройство обеспечивает гарантированное попадание трубы (прутка) в правильный блок за счет максимального приближения правильного калибра к формиющим роликам. Однако такому устройству присущи все другие, отмеченные выше, недостатки правильных устройств с жестко установленным правильным блоком.

Следует также уделить внимание поводкам, появляющимся при термообработке готовых

профилей. В некоторых случаях, профили после формообразования требуют термообработки для снятия остаточных напряжений и обеспечения заданных механических свойств. Наибольшие поводки в таких случаях вызывает

операция закалки (для алюминиевых авиационных сплавов). Во избежание значительных поворотов при этом, закалку профилей сочетают с фиксацией в специальных приспособлениях [9], обеспечивающих сохранение формы и не снижающих минимально допустимых скоростей охлаждения.

1.6. Учет различных факторов при теоретическом рассмотрении стесненного изгиба

В теории обработки металлов давлением сложился традиционный подход к теории гибки, ограничивающийся в большинстве случаев рассмотрением чистого изгиба. Этому подходу посвящено значительное количество работ [76, 77, 78, 79 и др.]. В классической постановке задача гибки рассматривается [80] как изгиб прямоугольных пластин за пределами упругости на основе метода упругих решений в сочетании с вариационным методом.

Вариационное уравнение равновесия включает искомую функцию прогибов, которая аппроксимируется рядом Фурье, а также функцию пластичности. Интегрирование по поверхности выполняется численным методом Гаусса или Чебышева. Решение уравнения проводится путем последовательных приближений, причем за нулевое приближение берется решение упругой задачи. Данный подход, хотя и обладает определенной универсальностью в части учета заданных граничных условий, однако на практике оказывается весьма трудоемким. При чистом изгибе торцевое усилие T отсутствует, в чем легко убедиться, проинтегрировав тангенциальные напряжения s_u по толщине заготовки:

$$T = \int_{r_B}^{R_h} s_u \cdot dr = 0 ,$$

где r_B , R_h – радиусы кривизны внутреннего и наружного контуров зоны сгиба, r – текущая координата.

Тангенциальные напряжения при этом определяют, исходя из гипотезы плоских сечений [81]. Именно отличием стесненного изгиба от обычной гибки является то, что $T \neq 0$. Наличие торцевого поджатия приводит к утолщению материала, в то время как при обычной гибке имеет место утонение, хотя, как показывает ряд авторов [77, 81, 82], утонение может и не иметь места, если учитывать движение материала в окружном направлении. Работа [83], в которой рассматривается формообразование гофров, хотя и предполагает наличие торцевого поджатия, однако фактически не дает результата, отличного от известных решений цилиндрического изгиба.

К такому же противоречию приводит решение задачи стесненного изгиба широкой упрочняющейся изотропной полосы, основанное на интегрировании уравнений равновесия [84].

Наиболее правильно реальную картину формоизменения отражают, по видимому, решения задачи стесненного изгиба в штампе (рис.1.20), полученные на основе принципа минимума работы и метода Ритца [85]. Авторы отказываются от гипотезы плоских сечений ввиду действия при стесненном изгибе

касательных напряжений. При этом процесс деформирования рассматривается как аддитивная последовательность приращения деформации сдвига с последующей минимизацией квадратичного функционала. Затем интегрированием по параметру находится величина утолщения ΔS в зоне сгиба:

$$\Delta S = e \cdot (R - r_0) \cdot \left(1 + \frac{nr}{R}\right) \cdot \cos\left(\frac{pj}{2a}\right); \quad e = \frac{p \cdot \Delta h}{2a \cdot (R + r_0)};$$

$$n = 2 \frac{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \cdot [p^2 - (4a)^2]}{\left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) \cdot [p^2 + (4a)^2]},$$

где R, r_0 – начальные наружный и внутренний радиусы; ε – относительная осадка; h – осадка прямолинейного участка; $2a$ – уголгиба; φ – текущий угол.

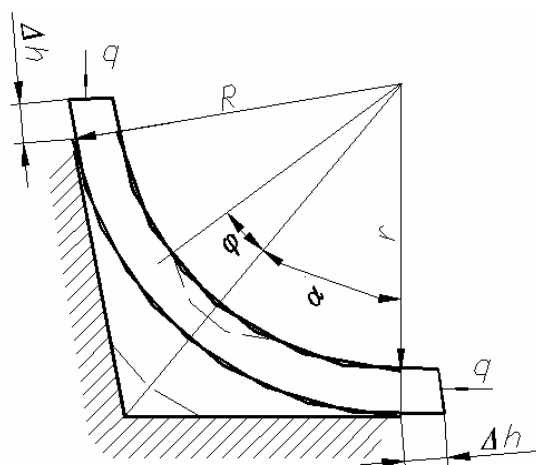


Рис. 1.20. Схема формообразования угловой зоны в штампе при СИ

Равномерно распределенное по толщине тангенциальное усилие сжатия определяется с учетом трения из условия равенства работ внутренних и внешних сил. Следует, однако, отметить, что в данной задаче рассматривался только случай гибки с закрепленными концами, что для профилирования в роликах оказывается вполне приемлемым. Дело в том, что роликах величина осадки Δh значительно превосходит приведенную величину осадки, найденную путем деления разности площадей сечения при стесненном изгибе и обычной гибке на толщину исходного листа.

В работе [86] исследуется напряженное состояние на основе гипотезы ортогональных линий, суть которой состоит в том, что существуют два семейства характеристических линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением главных напряжений.

Такая же задача решалась и методом возмущений [17]. В этом случае в качестве нулевого приближения брали решение задачи чистого изгиба, а возмущенную систему линеаризировали с помощью метода Крылова-Боголюбова-Митропольского в растянутых координатах Лайтхилла. Данный подход является весьма перспективным в том отношении, что он позволяет выявлять тонкие эффекты, например, особенности в распределении интенсивности деформаций. К недостаткам данного подхода следует отнести большой объем аналитических вычислений.

Теория сложного сопротивления при изгибе листа из идеального жестко-пластического материала с учетом продольной и поперечной силы рассмотрена

Прагером [87]. Формулировка условия текучести в данном рассмотрении имеет вид:

$$\overline{M} + \overline{N}^2 + \frac{9}{4}\overline{Q}^2 - 1 = 0, \quad \overline{M} = \frac{M}{M_0}, \quad \overline{N} = \frac{N}{N_0}, \quad \overline{Q} = \frac{Q}{Q_0},$$

$$M_0 = \frac{BS_0}{4}s, \quad N_0 = BS_0s_T, \quad Q_0 = BS_0s_T,$$

где M – изгибающий момент; N – продольная сила; Q – поперечная сила; B – ширина заготовки; S_0 – толщина заготовки; s_T – предел текучести материала.

Вообще, приближенное условие, сформулированное Прагером, в модифицированном виде встречается у других авторов [88, 89, 17]. Однако, эти теории более справедливы для брусов, чем для тонкостенных профилей, для которых в большей степени справедлива теория оболочек [90].

Упрочняемость авиационных материалов при деформировании требует учета этого эффекта при моделировании процессов обработки металлов давлением [91], в частности, в процессах гибки с приложением дополнительных усилий сжатия или растяжения [92, 93].

Кроме этого, следует учитывать также анизотропные свойства материалов, которые обусловлены самой прокаткой, или же преднамеренным изменением режимов процесса с целью получения рациональной анизотропии [94]. Используется несколько видов показателей [95]:

- показатели анизотропии относительного удлинения A_d и временного сопротивления разрыву A_{s_B} :

$$A_d = 2 \left(\frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} \right), \quad A_{s_B} = 2 \frac{s_{B2} - s_{B1}}{s_{B1} + s_{B2}},$$

где d_1 и d_2 – относительное удлинение вдоль и поперек прокатки; s_{B1} и s_{B2} – временное сопротивление разрыву вдоль и поперек прокатки;

- коэффициент Крупского и Кавинского:

$$h_a = \frac{A_h}{A_B},$$

где A_h , A_B – показатели изменения толщины и ширины образца соответственно;

- коэффициент Лэнкфорда:

$$R = \frac{\lg\left(\frac{b_0}{b_k}\right)}{\lg\left(\frac{h_0}{h_k}\right)},$$

где b_0, h_0, b_k, h_k – начальные и конечные значения ширины и толщины материала соответственно;

- коэффициент анизотропии :

$$r = \frac{\partial e_b}{\partial e_h},$$

где e_b, e_h – деформация по ширине и толщине образца соответственно.

Наибольшее распространение получили коэффициенты поперечной деформации m_{ij} [96], представляющие собой отношение деформаций по ширине (толщине) образца и деформации вдоль действия силы:

$$m_{ij} = -\frac{l_i}{l_j},$$

где l_i, l_j – соответствующие логарифмические деформации.

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

Учет влияния анизотропии в процессах гибки с приложением дополнительных усилий рассмотрен в работах [97, 98], где показано влияние анизотропии на изменение характеристик процесса при одновременном действии на заготовку поперечного и продольного сжатия. Так, у Лорета [97] для описания анизотропии упругопластического материала в промежуточной (разгруженной) конфигурации вводятся фиксированные (т.е. независимые от пластической деформации и инвариантные относительно жесткого движения) направляющие векторы. При этом разложение градиента деформации $E_0 = E \cdot P$ на упругую E и пластическую P составляющие однозначны, так как ориентация точки в промежуточной конфигурации фиксирована с помощью направляющих векторов. Используя второе начало термодинамики и пренебрегая влиянием пластической деформации на законы упругости, автор выводил определяющие соотношения для анизотропных упругопластических материалов при конечных деформациях. Рассмотрены начально анизотропные (трансверсально изотропные и ортотропные) и начально изотропные материалы с анизотропным упрочнением. Для последних определяющие соотношения получены как в промежуточной, так и (при малых упругих деформациях) в актуальной конфигурациях. Рассмотрение случая простого сдвига показывает, что при соответствующем выборе параметров можно избежать осцилляций касательных напряжений.

Хотя учет анизотропии при рассмотрении процессов гибки представляет собой довольно сложную задачу, тем не менее, учет этого фактора является желательным, так как от него зависят величины технологических параметров, например, в работе [17] внешние силовые факторы при стесненном изгибе зависят от анизотропных свойств материала и определяются по следующим определяющим формулам:

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

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

Рассмотренные выше работы по учету анизотропии относятся к схемам, характерным для кромкогибочных машин. Однако практически отсутствуют работы по гибке-прокаткой стесненным изгибом, где бы устанавливалось влияние анизотропии на технологические параметры процесса и его возможности.

При изготовлении профилей гибкой-прокаткой существуют ограничения двоякого рода:

- ограничения, связанные с нарушением заданных форм и размеров изделия;
- ограничения, связанные со структурными изменениями в заготовке вследствие пластических деформаций.

Ограничения первого рода обусловлены тем, что внешние силы, приложенные к заготовке, не создают требуемой формы и размеров детали. К числу таких ограничений (характеристик) следует отнести: недоформовка по высоте сечения, размалковка (пружинение), прогиб, саблевидность, винтообразное скручивание [99, 100] и кромковая волнистость [101]. Все эти дефекты обусловлены ошибками в выборе форм предварительных переходов, настройке оборудования.

Ограничения второго рода связаны с тем, что при пластической деформации в отличие от упругой происходит разрыв и установление новых связей, таких же устойчивых, как и до деформации. Если же новые связи не образовались, то наступает разрушение. Использование теории дислокаций позволяет выяснить природу деформации и разрушения [102], однако в практике металлообработки гораздо чаще с этой целью прибегают к анализу зеренной структуры [103], которая в некоторых случаях позволяет определять напряженно-деформированное состояние [104]. В этом случае для получения качественной детали требуется задание надлежащих технологических режимов: ширина заготовки, зазоры в роликах, параметры оснастки и т.п..

При обычной гибке разрушение металла происходит на наружном контуре зоны сгиба, когда радиусгиба становится меньше допустимого значения. В различных работах подходы к определению предельного радиуса различны. Так, в работе [104] предлагается следующая формула, полученная на основе вычисления критических степеней деформации с учетом вида напряженного состояния:

$$\frac{r_{\min}}{S_0} = \frac{1 - 0,5(1 - \Psi_{\text{ш}})^{-0.47}}{(1 - \Psi_{\text{ш}})^{-0.47} - 1},$$

где $\Psi_{\text{ш}}$ – характерный размер шейки образца, испытанного на одноосное растяжение.

Несколько иной вид выражения для предельного радиусагиба с учетом утонения дается в статье [105]:

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

где η – коэффициент утонения; Ψ_p – поперечное сужение образца при растяжении.

В монографии [96] предлагается формула для определения $r_{\min}$ для ортотропного материала в следующем виде:

$$\frac{r_{\min}}{S_0} = \frac{1 - 0.5(1 - \Psi_{uu})^a}{(1 - \Psi_{uu})^a - 1},$$

где $a = -2\sqrt{1 - m_{12}m_{21}} \cdot \exp\left[-\frac{(1 + m_{12})^{0.72}}{\sqrt{1 - m_{12} + m_{21}^2}}\right],$

Здесь m_{12}, m_{21} – коэффициенты анизотропии.

Последняя модель представляется наиболее удачной, поскольку она учитывает анизотропные свойства заготовки и дает значения, наиболее близкие к экспериментальным [29].

При стесненном изгибе, в отличие от обычной гибки, предельные возможности определяются не одним параметром, а двумя, а именно, внутренним радиусом и утолщением, при которых начинается процесс локальной потери устойчивости материала по внутреннему контуру зоны сгиба [106].

К сожалению, в работах, посвященных предельным возможностям стесненного изгиба, как правило, рассматривается лишь предельно допустимый радиус, как, например, в работе [107]. Исключение составляет статья [108], где определяется диапазон допустимых значений как для радиусагиба, так и для утолщения. Для процесса гибки-прокатки сколь-либо удовлетворительные модели к настоящему времени отсутствуют, однако экспериментально предельные возможности для данного процесса установлены в работе [8].

Выводы по разделу 1

1. Анализ конструкций современных зарубежных и отечественных летательных аппаратов показал наличие в несущем каркасе значительного количества разнообразных тонкостенных деталей из профилей, которые можно изготавливать методом стесненного изгиба.

2. Метод стесненного изгиба позволяет получать тонкостенные профили с выгодной геометрией зон сгиба, близкой по форме к прессованным, и имеющие по сравнению с прессованными профилями более высокую коррозионную стойкость за счет лакирующего слоя и меньшую массу за счет минусового допуска. Такие профили, в сравнении с гнутыми обычной гибкой, выдерживают

на 10 – 12 % большую нагрузку при испытании на местную и общую потерю устойчивости.

3. Рассмотрение различных способов изготовления профилей стесненным изгибом в кромкогибочных устройствах, штампах, фильерах и в роликах позволило выявить ряд преимуществ изготовления профилей из мономатериалов в роликах (гибкой прокаткой).

4. Приложение к заготовке дополнительных аксиальных усилий позволяет существенно расширить технологические возможности процесса в части уменьшения предельно допустимого радиуса гибки на 20 % и пружинения в 2 – 3 раза.

5. Применяемое оборудование для изготовления профилей гибкой прокаткой обладает рядом недостатков с точки зрения использования его в мелкосерийном производстве: большие габаритные размеры, большая энергоемкость, большое количество оснастки. Уменьшение габаритов связано с тремя основными проблемами: расчетом оптимальных межклетевых расстояний, силовых характеристик и требуемой мощности электромотора и поиском путей обеспечения прямолинейности профиля в очаге деформации, так как уменьшение числа переходов ведет к поводкам профиля.

6. Проведенная на базе литературного и патентного поиска классификация существующих правильных машин и выполненный анализ средств правки профилей показали отсутствие приемлемых способов и устройств для обеспечения условий получения прямолинейных профилей в очаге стесненного изгиба.

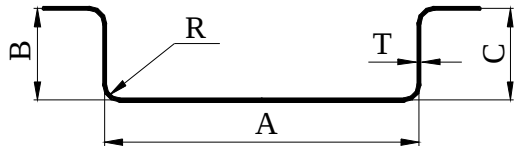
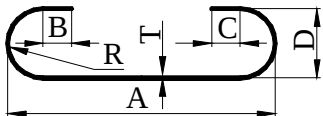
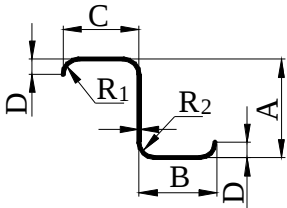
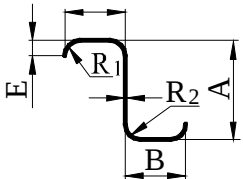
7. Выявлено, что применение существующих способов и устройств правки профилей, получаемых гибкой – прокаткой, дает малую эффективность их при стесненном изгибе малопластичных сплавов и композиционных материалов, за исключением правки растяжением профилей с небольшими поводками. Поэтому наиболее эффективным способом получения прямолинейных профилей стесненным изгибом является предупреждение образования поводков в очаге пластических деформаций при их формообразовании.

8. В части разработки рациональных технологических схем к настоящему времени отсутствуют удовлетворительные математические модели процессов стесненного изгиба, которые бы позволяли производить расчет требуемых параметров при гибке прокаткой (хотя для общей схемы гибки с торцевым поджатием существует ряд более или менее удовлетворительных моделей). Отсутствие достаточного теоретического и экспериментального обоснования не позволяло продолжительное время разработать малопереходную технологию изготовления профилей стесненным изгибом.

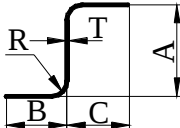
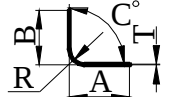
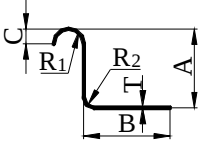
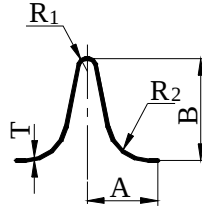
9. Как следствие вышеперечисленных недостатков в области изготовления профильных деталей в авиастроении следует отметить, что на момент начала настоящей работы в отрасли отсутствовало оборудование и нормативно-техническая документация по изготовлению профилей и деталей из них.

Таблица 1.1

Номенклатура гнутых профилей, применяемых зарубежными авиастроительными фирмами

№	Типоразмер	A	Б	C	R ₁	T	Д	Е	P ₂	Ф
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		6 – 152	3 – 76	3 – 60	0,8 – 5,6	0,3 – 3,2				
2		8 – 35	1 – 13	1 – 13	0,6 – 11,4	0,5 – 13	1 – 22,8			
3		13 – 100	13 – 77	1 – 45	1,0 – 8,6	0,5 – 2,3	4 – 13	1 – 15	1,0 – 7,6	
4		19 – 97	18 – 51	10 – 45	1,0 – 6,4	0,8 – 2,8		4 – 15		

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5		7 – 77	5 – 40	8 – 52	1,5 – 5,6	0,3 – 0,8				
6		10 – 43	15 – 98	55° – 101°	1,6 – 64	0,5 – 3,2				
7		18 – 52	7 – 24	0 – 15	3,0 – 12,7	0,5 – 2,7			1,5 – 5,6	
8		19 – 30	14 – 35		1,6 – 7,1	0,4 – 1,1			1,5 – 6,4	

Продолжение табл. 1.1

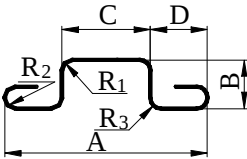
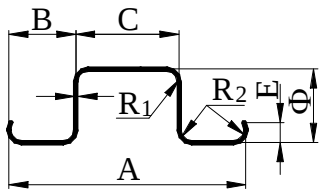
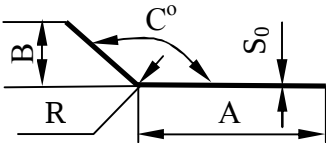
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9		58	25	24	3,2	1,6	17	3,2	3,2	
10		36 – 126	6 – 48	16 – 25	2,3 – 7,1	0,6 – 2,6		5 – 22	3,0 – 5,6	22 – 64
11		10 – 43	15 – 28	Угол 55 °– 101°	1,6 – 6,4	0,5 – 3,2 T = S ₀				
Примечание: Используемые материалы – преимущественно алюминиевые сплавы различных составов, а также титановые сплавы (для последних – внутренние радиусы превышают шесть толщин исходного материала)										

Таблица 1.2

Типаж гнутых профилей, применяемых в отечественном авиастроении

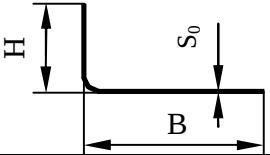
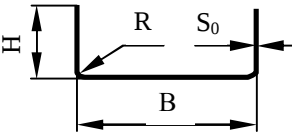
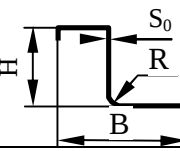
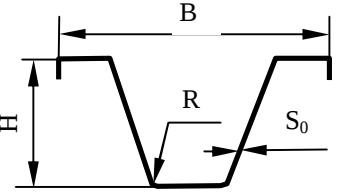
№№ пп	Тип профиля	Количество профилей размеров, шт.	Геометрия сечения	Размеры, мм				
				B	H	S ₀	R	Ширина заготовки (max)
1	Угловые	155		10 – 90	2 – 60	0,6 – 4,0	1,0 – 5,0	135
2	Швеллеры	55		10 – 175	2 – 100	0,6 – 5,0	1,0 – 6,0	280
3	Z-образные, в том числе с отбортовками	38		16 – 90	13 – 65	0,6 – 2,0	1,2 – 5,0	125
4	Корытные, в том числе с отбортовками	43		30 – 94	8 – 50	0,6 – 2,0	1,2 – 6,0	200



Рис. 1.17. Машины для правки профилей и сортоправильные машины

2. ПРАВКА ПРОФИЛЯ В ОЧАГЕ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА

Анализ существующих процессов правки и особенностей метода стесненного изгиба на гибочно – прокатных станках показал, что проблемы получения прямолинейных профилей при их формообразовании стесненным изгибом гибкой-прокаткой ранее не ставились, а потому они требовали специального изучения и принятия соответствующих решений. В частности, отсутствовали классификации существовавших и возможных схем создания условий, обеспечивающих прямолинейность получаемых профилей; не была выявлена степень влияния различных параметров профилирования на поводки получаемых профилей; отсутствовали математические модели, относящиеся к процессу осадки заготовки и ее одновременной правке; не были решены вопросы создания правильных устройств, учитывающих особенности реализации метода стесненного изгиба на гибочно-прокатных станках, а также не были сформулированы рекомендации по конструкции гибочно – прокатных станков и оснастки, учитывающие получение профилей с минимальными поводками. Стабилизация процесса профилирования методом стесненного изгиба (с точки зрения обеспечения прямолинейности профилей) также представляла собой проблему, сдерживавшую широкое внедрение метода СИ в производство.

2.1. Классификация процессов предупреждения поволоки профилей при их формообразовании методом стесненного изгиба гибкой прокаткой

Все способы правки профилей, осуществление которых возможно одновременно с гибкой–прокаткой методом стесненного изгиба, в зависимости от вида деформации, можно представить четырьмя основными классами (см. табл.4): правка изгибом, растяжением, раскручиванием и специальными способами. Каждый класс в зависимости от способа приложения нагрузки может быть представлен двумя группами: однократные и многократные. Каждая группа в зависимости от направления и количества действующих сил правки подразделяется в основном на три подгруппы.

Правка изгибом осуществляется путем смещения правильного блока относительно последней пары формообразующих валков. При этом возможны одно- и многократные правки. Каждая из них подразделяется на одноплоскостную, двухплоскостную и двухплоскостную с раскручиванием. Например, профиль выходящий из последней пары формообразующих валков подается в правильное устройство (рис. 1.18) с одной парой роликов, или инструментальной фильерой, которые имеют регулировку только в вертикальной плоскости. Этот случай реализует способ правки, который согласно классификатору можно назвать одноплоскостной однократной правкой изгибом (рис. 2.1, схема Ia-1).

Если тот же блок имеет регулировку в двух плоскостях (обычно в вертикальной и горизонтальной), то происходит двухплоскостная однократная правка изгибом (рис. 2.1, схема Ia-2). Добавляя этому блоку регулировку по углу в плоскости, перпендикулярной оси правки, получаем однократную двухплоскостную правку изгибом с раскручиванием (рис. 2.1, схема Ia-3).

Многократная правка будет происходить в том случае, когда правильное устройство профилирующего станка будет иметь несколько пар (обычно две пары) правильных роликов в одном блоке. Расположенные в одной или двух плоскостях, они обеспечивают многократную одно- и двухплоскостную правку изгибом (рис. 2.1, схема Iб-2).

Правка растяжением может осуществляться при сочетании гибки – прокатки с волочением [8]. Кроме того, возможно создание напряжений растяжения в профиле, находящемся между формообразующими валками, за счет увеличения диаметров или скорости вращения последующих валков по сравнению с предыдущими. В зависимости от установки формирующих валков (со смещением или без него) правка растяжением может быть одно- двухплоскостной и двухплоскостной с раскручиванием, если протягиваемый профиль происходит через правильный блок, повернутый относительно последней пары формирующих валков на определенный угол (см. рис. 2.1, класс II).

Правка раскручиванием при формообразовании осуществляется путем поворота правильного блока относительно сечения калибра в последней паре формообразующих валков на требуемый угол. Правка, в таком случае, в зависимости от количества и расположения блоков, также может быть одно- и многократной (см. рис. 2.1, класс III).

При стесненном изгибе правка профиля, направленная на устранение только основного его дефекта, часто не приводит к улучшению качества профиля вследствие большой его жесткости. Поэтому для создания благоприятных условий процесса правки возможно применение способов, использующих какое-либо дополнительное воздействие на материал заготовки с целью повышения его пластичности. Например, используют правку растяжением с нагревом, вибрацией, приложением ультразвуковых колебаний и т.д. Такого вида правку классифицируют по виду основной деформации IV класса (см. рис. 2.1).

Для определения степени влияния каждого вида правки на предупреждение поводок профиля, были проведены исследования по основным группам процессов, включенных в классификатор (рис. 2.1). В задачу исследования входило определение вида правки, оказывающего решающее воздействие на предупреждение поводок. Эксперименты проводились на нескольких типоразмерах профилей (рис. 2.2) из материалов Д16М, В95, Д16Т, 1420, 1420С, толщиной от 0,8 до 2,5 мм.

Наибольшее влияние на изменение величины поводок профиля оказывает положение правильного блока относительно очага деформации в последней паре формообразующих валков, т.е. его смещение от оси правки, что соответствует группам правки Ia-3 и IIIa-1 классификатора (см. рис. 2.1). Следовательно, основным видом правки профилей при их формообразовании методом стесненного изгиба на гибочно-прокатных станках следует выбрать правку изгибом относительно последней пары формообразующих валков. Таким образом, задача предупреждения поводок профиля может быть в значительной степени решена путем создания правильного устройства, учитывающего особенности метода стесненного изгиба в роликах гибочно-прокатных станков.

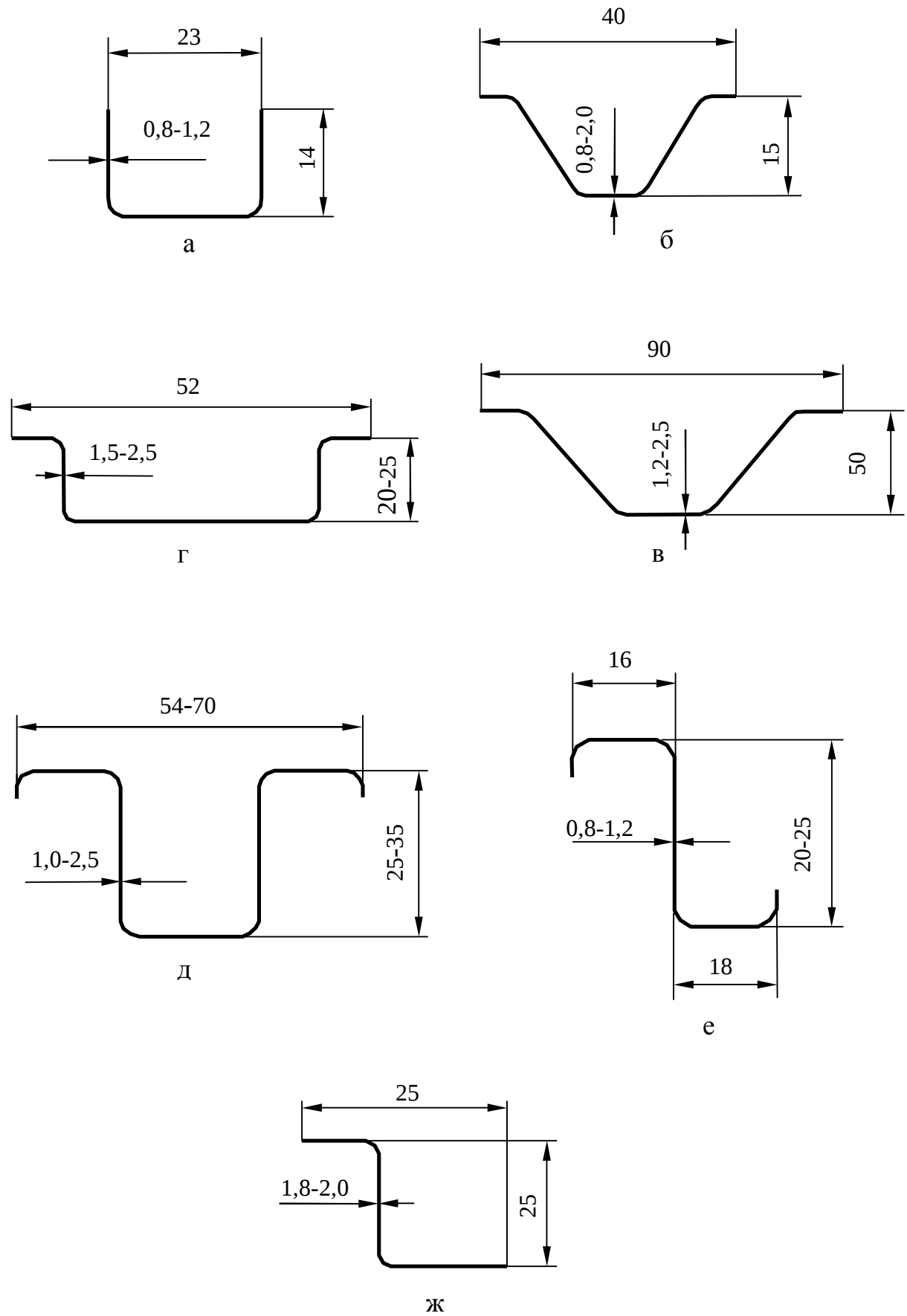


Рис. 2.2. Поперечные сечения исследуемых профилей

2.2. Математическое планирование эксперимента

С целью определения степени влияния различных параметров профилирования на прогиб профилей при формообразовании их без применения правильного устройства была осуществлена серия экспериментов с использованием методики математического планирования. Планирование и проведение экспериментальных исследований, установления зависимости поворота профилей от параметров формообразования осуществлялось на основе полного (факторного эксперимента типа 2^3) [109].

С целью получения уравнений регрессии, описывающих поворота профилей на основе математической модели [5], устанавливали уровни варьирования факторов, оказывающих влияние на процесс получения прямолинейных профилей при их формообразовании методом стесненного изгиба гибкой–прокаткой. Модель процесса можно представить функцией:

$$y = f(B; \sigma_{02}; Z), \quad (2.1)$$

где y – величина прогиба профиля; B – ширина развертки заготовки; σ_{02} – условный предел текучести материала; Z – величина зазора в формующем калибре окончательного перехода.

Зависимость прогиба от выбранных факторов удобно записать в виде:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^N b_i x_i, \quad (2.2)$$

где $\bar{y}$ – выборочное значение параметра оптимизации (прогиба); $b_0; b_i$ – коэффициенты регрессии; x_i – кодированное значение факторов; N – общее количество опытов.

Уровни факторов и интервалы варьирования определены по результатам предварительных постановочных экспериментов и приведены в табл. 2.1. Матрица плана эксперимента и результаты измерений прогиба профилей представлены в табл. 2.2. Поперечное сечение исследуемого профиля дано на рис. 2.2-б.

Таблица 2.1

Уровни факторов и интервалы варьирования

Значения факторов	x_1	x_2	x_3
	σ_{02}	B	Z
Основной уровень (0)	30	62	1,2
Интервал варьирования	10	1	0,1
Нижний уровень (-1)	20	61	1,1
Верхний уровень (+1)	40	63	1,3

Для каждой строки матрицы планирования определяли среднее арифметическое значение y параметра оптимизации и дисперсию каждого опыта S_j^2 . Результаты расчетов заносили в табл. 2.2.

Используя критерий Кохрена (G_p), проверяли гипотезу однородности

дисперсии S_j^2 опытов (см. табл. 13, [109]):

$$G_p = 0,218 < G_{p_{\text{табл}}} = 0,4377; \quad (2.3)$$

т.е. дисперсии однородны. Вычисленная дисперсия воспроизводимости эксперимента составляла:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 = 2,02; \quad (2.4)$$

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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (2.5)$$

Коэффициенты регрессии определяли по известным формулам теории полного факторного эксперимента [109]. В результате расчетов получены следующие значения коэффициентов:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3;$$

$$b_0 = 147,1; b_1 = -4,6; b_3 = -10,4; b_{12} = 3,1; b_{13} = -0,4; b_{23} = 1,0; b_{123} = 2,3.$$

Полученные результаты позволяют записать регрессионную зависимость для прогиба:

$$y = 147,1 - 4,6\sigma_{0,2} + 10B - 10,4Z + 3,1\sigma_{0,2}B + \sigma_{0,2}BZ. \quad (2.6)$$

В принятых диапазонах изменения факторов последнее уравнение показывает, что с увеличением ширины развертки B прогиб увеличивается, а с увеличением зазора Z – уменьшается.

Таблица 2.2

Матрица планирования, параметры оптимизации и их дисперсии

№№ опыта	x_1	x_2	x_3	$V_1 = \text{прогиб, мм/м}$				Дисперсия
	σ_{02}	B	Z	1	2	3	V_1	S_j^2
1	+	+	–	162	165	163	163,3	
2	–	–	–	155	154	152	153,1	3,535
3	+	–	–	144	142	144	143,3	2,340
4	–	+	–	171	168	169	169,6	2,340
5	+	+	+	150	148	146	148	1,335
6	–	–	–	134	136	138	136	4,000
7	+	–	–	115	115	116	115,3	0,335
8	–	+	–	146	145	148	147,6	2,34

Затем находили дисперсию $S^2\{b_i\}$ коэффициентов регрессии:

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{n \cdot N} \cdot S_y^2 = 0,084, \quad (2.7)$$

после чего устанавливали величину доверительного интервала Δb_i

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S\{b_i\}, \quad (2.8)$$

где t табличный коэффициент, равный 2,12 (табл. 14, [109]).

В формуле (2.8) значение

$$S\{b_i\} = \sqrt{S^2\{b_i\}}. \quad (2.9)$$

При указанных значениях входящих величин $\Delta b_i = \pm 0,62$, что дает возможность оценить статистическую значимость коэффициентов регрессии. Значимыми являются все коэффициенты, превосходящие величину доверительного интервала, кроме $b_{13} < \Delta b_i$.

Поэтому коэффициент b_{13} был исключен из уравнения регрессии (2.6), которое приняло следующий вид:

$$\hat{y} = 147,1 - 4,6x_1 + 10x_2 - 10,4x_3 + 3,1x_1x_2 + 2,1x_2x_3. \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) характеризует модель зависимости прогиба от выбранных факторов x_1 ; x_2 ; x_3 .

Далее определяли дисперсию адекватности установленной модели в соответствии с зависимостью:

$$S_{ад}^2 = \frac{n \cdot \sum_{j=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)}{N - (R + 1)}, \quad (2.11)$$

где $\hat{y}$ – значение прогиба, вычисленное по модели для условий i -го опыта $S_{ад}^2 = 0,105$.

При помощи критерия Фишера (F_p) проверяли гипотезу адекватности модели (см. табл. 12, [109]):

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} < F_{p_{табл}} = 5,9 \quad F_p = \frac{0,105}{2,02} = 0,05 < 0,59 \cdot 10. \quad (2.12)$$

Качество построенной модели характеризует табл. 2.3, полученная в результате расчетов в соответствии с формулами (2.1) – (2.12).

Таблица 2.3

Показатели регрессионного анализа

Параметр оптимизации	Дисперсия воспроизводимости опытов	Критерии Кохрена		Критерий Фишера	
	S_y^2	G_p	$G_{p_{табл}}$	F_p	$F_{p_{табл}}$
Прогиб y	2,02	0,2180	0,4377	0,5	5,9

Наибольшее влияние на прогиб оказывает ширина развертки заготовки и величина зазоров в калибре роликов окончательного парохода. Причем прогиб увеличивается с увеличением B_3 и уменьшением Z . Влияние σ_{02} на поводки ме-

нее значительно, с увеличением σ_{02} прогиб уменьшается (см. зависимость (2.10)).

Зависимость $y = f(B; \sigma_{02}; Z)$, полученная из уравнения (2.10), удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными для исследуемого типоразмера профиля (см. рис. 2.2-б). Отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышало (2 – 3) %.

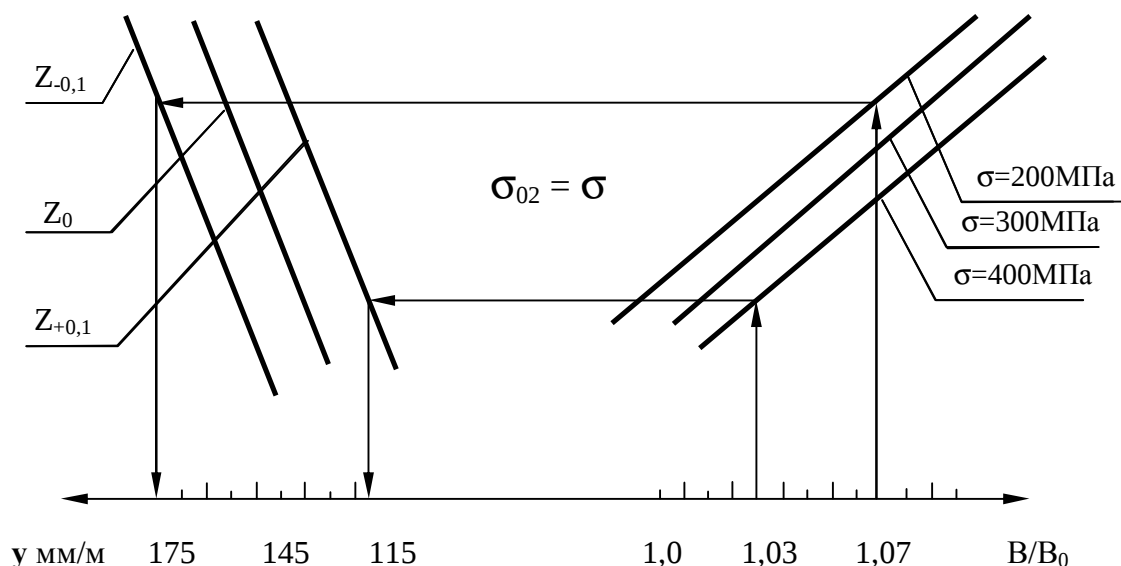


Рис. 2.3. Зависимость прогиба от параметров процесса

На основе формулы (10) была построена номограмма, позволяющая определять прогиб профиля в зависимости от исходной ширины заготовки B/B_0 , пластических свойств материала σ_{02} , и зазора в калибре Z (рис. 2.3) для профиля рис. 2.2-б.

1.3. Выбор схемы правильного устройства

Процесс получения профилей методом стесненного изгиба можно рассматривать состоящим из двух этапов. Первый этап – получение из полосы (ленты) профилированной заготовки (за один-два перехода) с большими относительными радиусами ($R > 5S$, где R – радиус зоны сгиба, S – толщина исходной заготовки). Второй этап предусматривает формообразование профиля окончательной геометрии с малыми относительными радиусами. Второй этап выполняется обычно за один переход при больших пластических деформациях со значительными изменениями формы заготовки. Деформация по сечению профиля является неравномерной вследствие особенностей протекания процесса стесненного изгиба, связанных с осадкой заготовки. Соответствующее распределение остаточных напряжений по сечению профиля также оказывается неравномерным. Как показывают рентгеноструктурные исследования, максимумы остаточных напряжений приходятся на зоны сгиба профиля, а по полкам и стенкам абсолютные значения величин остаточных напряжений принимают средние значения [110].

Участок заготовки, проходящий через рабочий контур стесненного изгиба, находится в состоянии, приближающемся к состоянию так называемого «пластического шарнира». Поэтому всякое дополнительное воздействие на этот участок существенно влияет на процесс деформирования и на прямолинейность профиля, выходящего из последней пары валков. Такое дополнительное воздействие может возникнуть как от изменения текущих параметров профилирования (ширины развертки заготовки, условий смазки и т.д.), так и от смещения правильного блока относительно оси прокатки.

При формовке профилей стесненным изгибом было замечено, что сместить профиль, выходящий из последней пары формообразующих валков, можно приложением внешней силы небольшой величины. Однако при остановленном станке сместить профиль без нарушения его формы не удастся, причем потребная сила многократно превосходит силу поворота «пластического шарнира». Выходя из гибочно-прокатного станка, тонколистовой профиль вследствие релаксации напряжений приобретает жесткость и последующая его правка затруднена. Возникает необходимость предупреждения поволоки непосредственно в очаге формообразования, где в процессе деформирования предварительно сформованной заготовки в профиль окончательной геометрии при движении заготовки имеется «пластический шарнир». То есть необходимо приложить дополнительные силы в очаг деформации через жесткий участок уже сформованного профиля. Эти силы должны быть строго определенными по величине и направлению с тем, чтобы предотвратить зарождающиеся поводки. Приложение сил правки осуществляют с помощью правильного устройства, типовая конструкция которого описана в разделе 1 данной книги. Имеющиеся горизонтальная, вертикальная и угловая регулировки позволяют перемещать правильный калибр в необходимом для правки направлении.

Величину необходимого смещения правильного блока определяют следующим образом: после настройки оси прокатки станка, по ней выставляют правильный калибр и прокатывают первую заготовку. Замеряют имеющиеся поводки на длине 1 метр с точностью $\pm 0,1$ мм, а затем подсчитывают величину регулировок правильного блока. Рассмотрим пример, когда прогиб профиля составил 13,6 мм/м. Так как правильный блок отстоит от последней пары формообразующих валков на 250 мм, то требуемую регулировку получим из соотношения:

$$\frac{1}{13,6} = \frac{0,25}{x}, \text{ отсюда } x = 13,6 \cdot 0,25 = 3,35 \text{ мм.}$$

Описанную процедуру повторяют до получения требуемой прямолинейности. Также возможен расчет регулировок графическим способом. Для этого на первом профиле замеряем имеющиеся поводки (пусть, например, прогиб $\Pi_1 = 13,6$ мм/м) и откладываем эту величину на оси ординат. Регистрируем координату положения правильного блока, подсчитываем регулировку R_{Π_1} и наносим ее на ось абсцисс (рис. 2.4). После чего прокатываем второй профиль с другим значением регулировки R_{Π_2} . Замеряем имеющийся прогиб Π_2 . В результате на графике рис. 2.4 получаем точку **A** с координатами R_{Π_1} и Π_1 и точку **B** с координатами R_{Π_2} и Π_2 . Проводим

прямую через эти точки до пересечения с осью регулировок. В точке пересечения получим величину необходимой регулировки $R_{п3}$. Производя вычитание $R_{п2} - R_{п3} = R_{п1}$, получим абсолютную величину необходимого смещения правильного блока.

После проведения настройки положения правильного блока, найденная величина настройки фиксируется и вводится в технологический процесс для данного типоразмера профиля при заданных условиях формообразования.

Однако, применение жестко установленного правильного блока при изготовлении профилей методом стесненного изгиба, вследствие особенностей процесса, часто не позволяет стабильно получать профили требуемой прямолинейности. Наблюдается значительный разброс поводок при жесткой установке правильного блока и формирующих роликов, не учитывающей изменения текущих условий профилирования [111]. Поэтому были проведены исследования по выбору такой схемы приложения усилий правки, которая бы учитывала возможность приложения переменных воздействий при жесткой установке станины правильного блока.

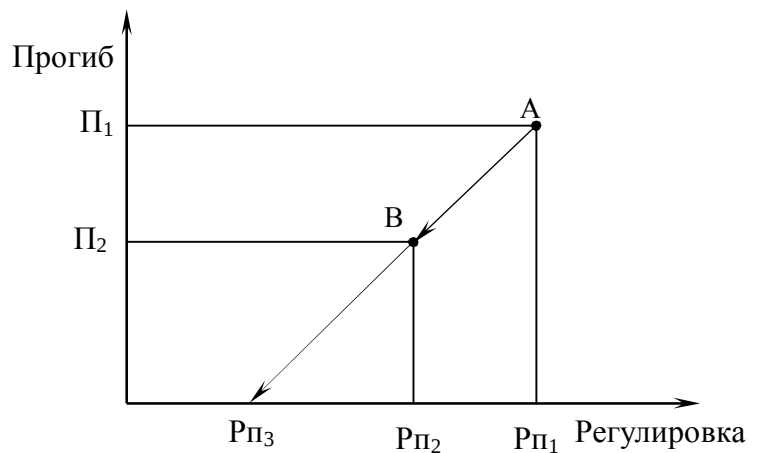


Рис. 2.4. Графическое определение регулировки правильного блока

Возможные схемы приложения сил правки при помощи правильного устройства представлены классификатором (рис. 2.5), где приведены схемы приложения сил в процессе правки, разбитые по классам.

Первый класс охватывает схемы с приложением сил по одной линии для исправления поводок в одной плоскости. Для осуществления схем первого класса используют перемещение правильного блока только от одной регулировки устройства, например, только в вертикальном направлении. Приложение сил правки по схемам **второго** класса используют для одновременной ликвидации поводок в двух плоскостях (например, прогиба и саблевидности). Схемы **третьего** класса включают приложение сил правки по трем направлениям и используются для одновременной ликвидации саблевидности, прогиба и скручивания.

Все схемы были осуществлены на правильном устройстве (рис. 1.18) с использованием различных вариантов правильной оснастки (рис. 2.6). Задачей исследования был выбор схемы (видов правильных блоков (рис. 2.7)) предупреждения поводок при наименьшем количестве переналадок правильного устройства в очаге пластической деформации по каждой схеме приложения сил правки.

Для этого в качестве объектов исследования использовались:

- **По классу I классификатора** (см. рис. 2.5):
 1. Пара металлических роликов (рис. 2.6-а).
 2. Пара роликов, в которой один из роликов установлен на резиновой подушке (рис. 2.6-б).
 3. Пара роликов, один из которых выполнен из текстолита (рис. 2.6-в).
 4. Роликовый калибр, состоящий из двух горизонтальных и двух вертикальных роликов (рис. 2.6-г).
 5. Одна пара полиуретановых роликов (рис. 2.6-д).

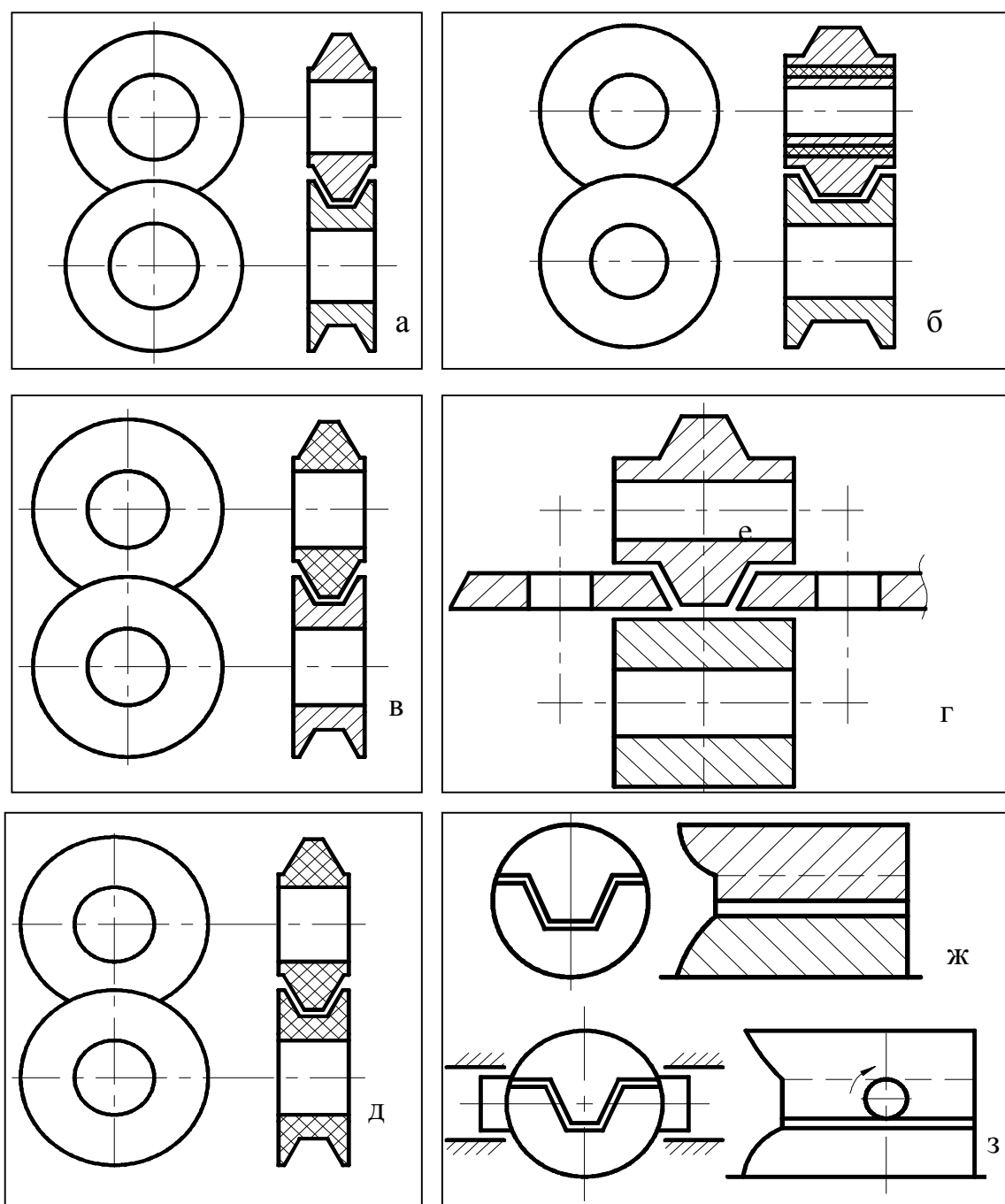


Рис. 2.6. Исследуемые схемы оснащения правильного блока

6. Инструментальная фильера, жестко закрепленная в правильном блоке, (рис. 2.6-е).

7. Инструментальная фильера с возможностью качания в одной плоскости (рис. 2.6-ж).

8. Два роликовых калибра на коромысле, с возможностью качания в одной плоскости (рис. 2.6-а,г).

- **По классу II классификатора:**

Использование тех же восьми видов оснастки с дополнительными фильерами и двумя роликовыми калибрами, связанными коромыслом и имеющими возможность качания в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях (рис. 2.7-б).

- **По классу III классификатора:**

Дополнительно к предыдущей оснастке использовали фильеру и два роликовых калибра на коромысле с возможностью дополнительного перемещения относительно оси правки (рис. 2.7-в) для предотвращения скручивания.

Одна пара металлических роликов (рис. 2.6-а) – наиболее широко применяемый вид правильной оснастки. Используя его для снижения поволок профилей до $\pm 3-5$ мм/м при стесненном изгибе необходимо произвести 5-7 переналадок правильного устройства. Люфт профиля в роликах не позволяет придать жесткое направление профилю. Разброс поволок при этом значителен (до $\pm 3-5$ мм/м) при однозначной установке самого правильного блока, а для улучшения характеристик прямолинейности (поводки менее 1 мм/м) необходимо применять дополнительные операции правки.

Такая оснастка проста в изготовлении, мало изнашивается, не оставляет задиров на профиле. Кроме того, одна пара металлических роликов может быть использована для получения профиля заданной кривизны непосредственно на гибочно-прокатном станке, что достигается соответствующим смещением всего правильного блока. Однако при этом не гарантируется попадание профиля в правильный калибр. С целью уменьшения люфта профиля в роликах и обеспечения более жесткого направления его один из роликов был выполнен на резиновой подушке (рис. 2.6-б). Снижение люфта достигалось обеспечением постоянного сжатия профиля в роликах за счет установки зазора между ними меньше толщины материала на 10 – 20%. Ожидаемого улучшения качества правки не произошло, но число переналадок правильного блока до получения профиля с поводками в пределах $\pm 3 - 5$ мм/м снизилось до 3 – 5.

В то же время на профиле отмечались незначительные задиры и следы от роликов. Для предупреждения появления задиров использовалась пара роликов, один из которых выполнен из текстолита (рис. 2.6-в). Исходный зазор в роликах также был несколько меньше толщины материала. Люфт уменьшился, задиры со стороны роликов из текстолита не было. Однако этот ролик был подвержен быстрому износу.

Для полной ликвидации задиров были изготовлены комплекты правильной оснастки из одной пары полиуретановых роликов (2.6-г).

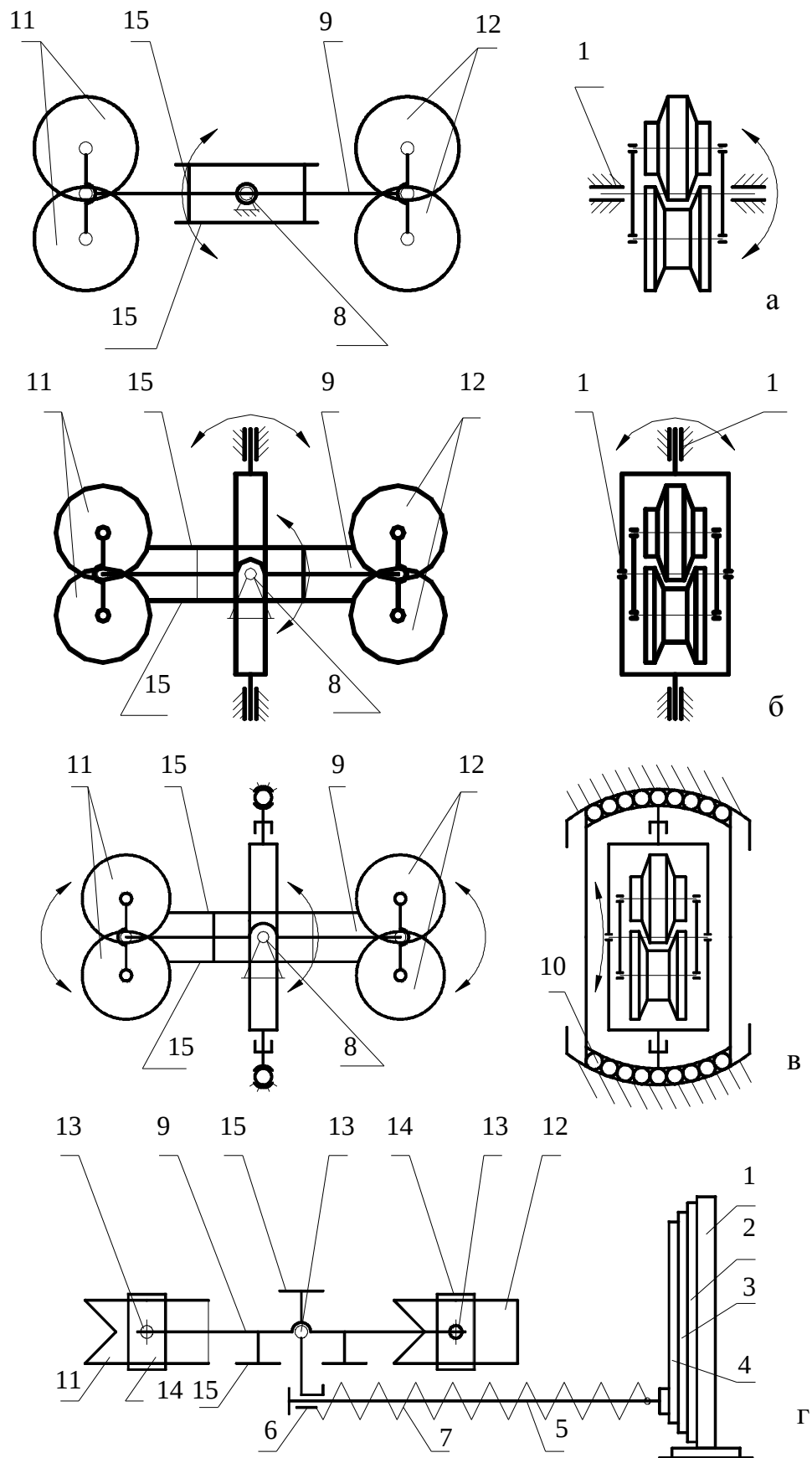


Рис. 2.7. Самонастраивающиеся блоки правки

При сближении на расстояние, меньшее межосевого, ролики соприкасаются по плоскостям, что снижает люфт профиля и позволяет создать ему жесткое направление. Количество переналадок сократилось до 2-4, однако, ролики быстро изнашивались в процессе изготовления профилей общей длиной не более 100 м. Особенно сильно шел износ при заходе профиля в ролики – острые кромки и заусенцы заходной части профиля резали полиуретан.

Для снижения затрат на изготовление оснастки был изготовлен универсальный роликовый калибр, обеспечивающий фиксацию профиля любого типоразмера из исследуемой номенклатуры. Он состоял из двух пар роликов (рис. 2.6-д) и позволял создать более равномерное распределение линейных скоростей в калибре и снизить (уменьшить) задиры на профиле. Величина люфта была незначительной, однако максимально достижимая прямолинейность составила $\pm 3 - 5$ мм/м, при 5 – 6 переналадках правильного блока.

В качестве оснастки правильного устройства также использовалась инструментальная фильера, жестко закрепленная в правильном блоке (рис. 2.6-е). Инструмент такого типа позволяет осуществлять жесткое направление профиля без каких-либо отклонений.

Возможность передачи определенной силы поджатия в очаг пластической деформации была реализована путем регулировки зазора в фильере, через которую проходит профиль. Выполняя специальным образом переднюю часть фильеры, ее можно расположить в непосредственной близости от очага деформации, что гарантирует попадание в нее профиля. Количество переналадок правильного устройства составляет 3 – 4. К недостаткам использования фильеры можно отнести следующие:

- наличие следов от фильеры на профиле;
- сложность изготовления;
- низкая износостойкость;
- заклинивание заходной части профиля в фильере, которое наблюдается при смещении фильеры от направления выхода профиля при исправлении поводов;
- при близком расположении фильеры к очагу деформации регулировка правильного блока часто не оказывает влияния на соответствующее изменение поводов из-за отсутствия жесткого участка профиля между очагом деформации и правильным блоком.

Во избежание заклинивания заходной части профиля фильера может быть выполнена с возможностью поворота (качания) в вертикальной плоскости. Однако остальных недостатков избежать не удастся. Их устранение потребовало бы значительного усложнения конструкции фильер (замена трения скольжения на трение качания и ряд других усовершенствований).

Все описанные виды правильной оснастки позволяют осуществить приложение постоянных по величине и направлению сил правки без учета постоянного изменения текущих параметров профилирования. Причем, использование таких видов оснастки требует трудоемкой настройки правильного устройства высококвалифицированным рабочим. Кроме того, качество правки не яв-

ляется удовлетворительным: поводки превышают ± 3 мм/м.

Как отмечалось выше, передача в очаг деформации дополнительных сил меняет схему напряженно-деформированного состояния. Это изменение принципиально сводится к приведению суммы моментов внутренних сил, действующих в поперечном сечении заготовки, в очаге максимальных пластических деформаций к нулю.

Из механики [71] известно, что некоторое сечение будет находиться в равновесии в том случае, если сумма моментов сил, приложенных к нему, относительно главных осей жесткости будет равна нулю. При таком распределении внутренних сил, поперечное сечение готового профиля будет стремиться к равновесию, обеспечивая тем самым его прямолинейность. Для выполнения этого требования необходимым является учет изменения текущих параметров профилирования при высокой точности настройки правильного блока.

На наш взгляд этим требованиям отвечает оснастка, схема которой представлена на рис. 2.7-г. На имеющейся станине 1 типового правильного устройства через установочные плиты 2, 3 размещается обойма 4 с возможностью вертикальной, горизонтальной и угловой регулировок. Обойма дополнительно содержит штанги 5, на которых расположены подпружиненные ползушки 6. Ползушки имеют возможность перемещения по штангам 5 и имеют шарниры 8, на которых расположены коромысла 9, имеющие свои шарниры 13, несущие корпуса 14 правильных калибров 11,12. Для обеспечения попадания профиля из первого калибра во второй, коромысла имеют верхний и нижний ловители 15.

При проведении экспериментов по первому классу схем приложения сил правки коромысла имели возможность качания в одной плоскости (рис. 2.7-а,г), по второму классу – в двух плоскостях (рис. 2.7-б), по третьему классу – калибры были дополнительно связаны рычагами (рис. 2.7-в), обеспечивающими поворот калибров в плоскостях перпендикулярных оси правки в противоположных между собой направлениях (табл. 2.4).

Наиболее простой по устройству является оснастка, имеющая возможность поворота в одной плоскости. При попадании профиля в первый калибр, он смещается в положение, соответствующее имеющимся поводкам; одновременно второй калибр смещается за счет коромысла относительно опоры в противоположном направлении. При попадании профиля во второй калибр происходит обратное перемещение калибра, т.е. первый калибр стремится перейти в положение, обратное поводкам, и воздействует через профиль на очаг деформации. На участке, между правильными калибрами, профиль принудительно занимает прямолинейное положение (за счет калибров и жесткого коромысла). При этом коромысла смещаются в положение наименьшего сопротивления выходу прямолинейного профиля. Одновременно правильный блок фиксируется в этом положении за счет жесткости находящегося в нем профиля.

При незначительном изменении какого-либо параметра профилирования и, соответственно, поводок, правильный блок самостоятельно поднастраивается за счет возможности перемещения под воздействием сил, действующих на первый и второй калибры.

Расположение правильного блока на штангах с возможностью его перемещения позволяет профилю гарантированно без заклинивания попадать в правильные калибры. Конструкция правильных калибров может быть различной (рис. 2.8).

Проведение серий постановочных экспериментов показало высокую эффективность данной схемы. Качество правки повысилось (поводки – не более 1 – 3 мм/м) при существенном уменьшении количества переналадок (1 – 2). Практически, требуется лишь первоначально выставить правильный блок по оси профилирования.

Наиболее простой и надежной в работе является оснастка имеющая возможность поворота в одной плоскости (см. рис. 2.7-а, г). Ее применение целесообразно при всех схемах приложения правильных усилий.

Применение более сложной схемы правильного блока (рис. 2.7-б) позволяет полностью исключить настройку правильного блока в процессе формообразования для профилей, имеющих симметричное поперечное сечение. Однако такого типа устройство сложнее в изготовлении и предварительной настройке.

Использование правильного блока по схеме рис. 2.7-в при стесненном изгибе нецелесообразно, поскольку для обеспечения попадания профиля в правильный блок часто требуется приложение дополнительных сил (направлять профиль вручную, придерживать первый калибр и т.д.).

Выводы по разделу 2

1. Исследования различных схем предупреждения поводок профилей позволили разработать оригинальную схему правки с созданием правильного устройства управляющего очагом пластической деформации с обеспечением прямолинейности получаемых профилей. Конструкция устройства защищена авторскими свидетельствами на изобретение.

2. На основании проведенного математически планируемого эксперимента построена модель зависимости прогиба профиля от механических свойств материала, ширины развертки заготовки, зазора в формующем калибре и определена степень влияния основных параметров процесса на прогиб профилей.

3. Вследствие значительной величины коэффициентов регрессии при основных параметрах и разброса поводок у каждого отдельного профиля определена необходимость применения правильного устройства, которое настраивалось бы на исправление величины прогиба существующего в каждом конкретном случае, т.е. имело возможность самонастройки.

4. С целью систематизации анализа процессов предупреждения поводок профилей разработан классификатор возможных процессов, предупреждающих поводки (профилей в очаге пластической деформации).

5. По основным группам процессов, представленных классификатором, разработаны, изготовлены и исследованы различные устройства и схемы предупреждения поводок профилей. Проведен анализ работы этих устройств.



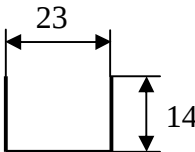
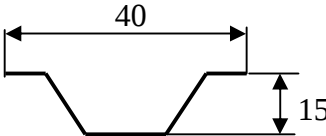
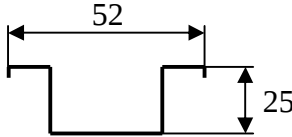
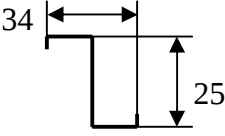
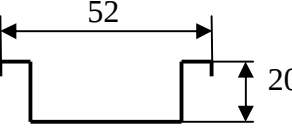
Рис. 2.1. Классификатор процессов правки профилей при их формообразовании стесненным изгибом



Рис. 2.5. Классификатор схем приложения сил для правки профилей при формообразовании

Таблица 2.4

Влияние вида закрепления качающегося правильного штока на поводки профилей

№№ пп	Типоразмер профиля	Материал	Ширина разверток, мм	Вариант закреплений согласно рис. 2.6	Поводки*			Кол-во перена- ладок	Примечание
			Утолщение зон сгиба, %		П	С	Скр.		
1		Д16АТ	49,0 / 10%	а, в	0	0	0	1	Рис. 2.6-а, б, в Схемы выполняются при попадании профиля в правильный блок
		Д16АМ	49,5 / 10%	г	0	0	0	1	
		О1420Т	49,5 / 10%	г	0	0	0	1	
		В9511Т2	49,5 / 10%	г	0	0	0	1	
		Д16АТ	49,5 / 10%	г	0	0	0	1	
2		Д16АТ	63 / 10%	а, в	0	0	0	1	
		Д16АМ	62,5 / 10%	а, в	0	0	0	1	
		О1420Т	63 / 10%	а, в	0	0	0	1	
3		Д16АТ	115,5 / 10%	а, в	0	0	5°	1	
		О1420Т		а, в	0	0	3°	1	
		Д16АТ		б	0	0	3°	0	
		О1420Т		г	0	0	3°	0	
4		Д16АМ	58,7 / 5%	г	2	3	5°	0	
		В95ПЧ	58,7 / 5%	г	2	3	5°	0	
		Д16АТ	58,7 / 5%	г	0	0	3°	2	
5		В95	85 / 5%	а, г	0	0	3°	2	
		О1420С	85 / 5%	б	2	3	0	0	
		Д16	85 / 5%	б	1	3	0	0	
Примечание: * П – прогиб; С – саблевидность; Скр. - Скрутка									

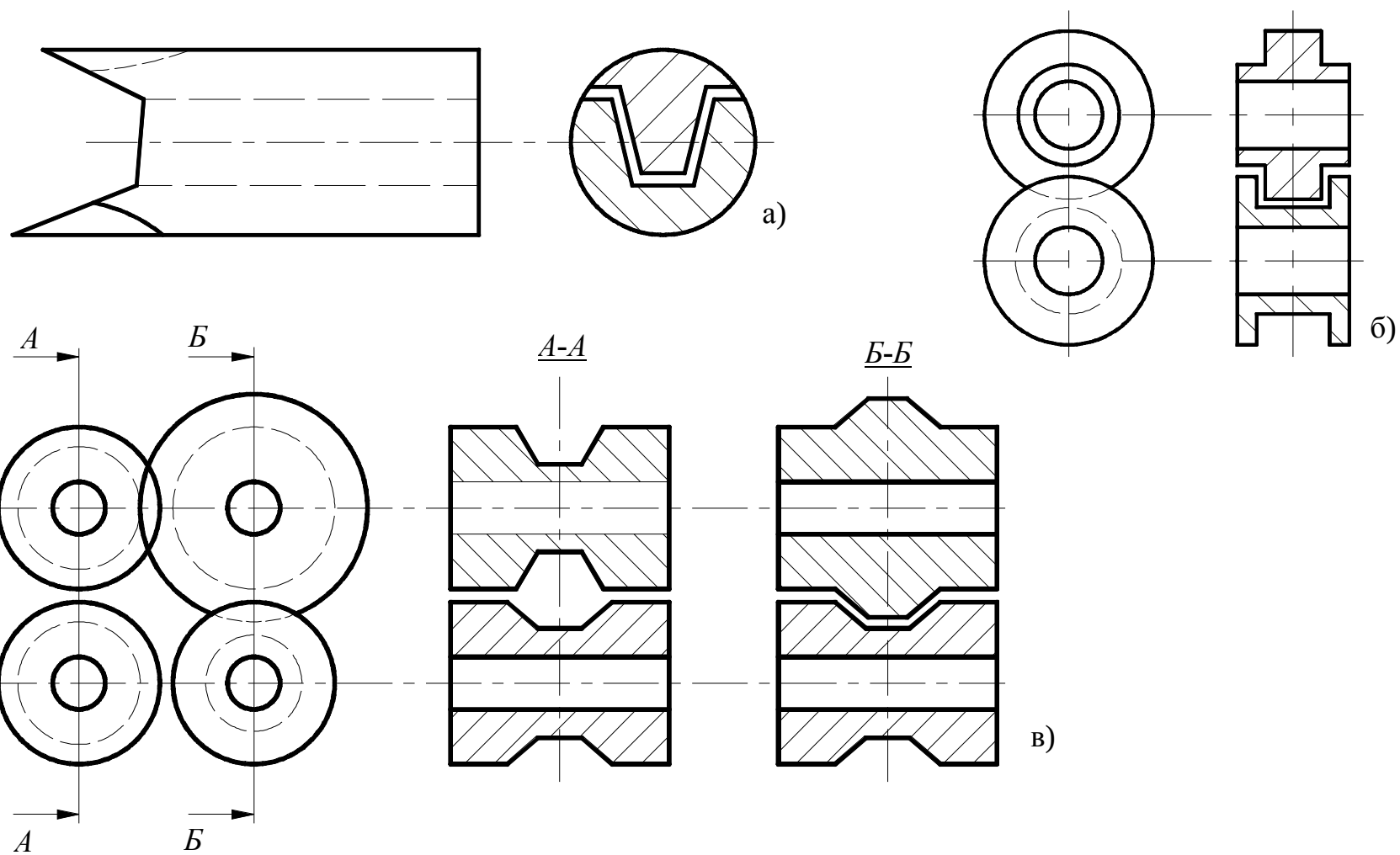


Рис. 2.8. Типы правильной оснастки: а – фильера; б – одна пара роликов; в – 4-х роликовый калибр

3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВБЛИЗИ ОСЕВОЙ ПЛОСКОСТИ РОЛИКОВОГО КАЛИБРА

Из анализа существующих источников выявлено, что основными факторами, препятствующими созданию технологии и оборудования для изготовления профилей гибкой прокаткой, являются дефекты профилей, связанные с различными причинами технологического характера. Поэтому для систематического изучения данных вопросов надлежит произвести классификацию схем реализации стесненного изгиба; на основе аналитического рассмотрения отобрать наиболее перспективные схемы и исследовать те из них, которые бы позволили интенсифицировать процесс, т.е. получать минимальный внутренний радиус и максимальное утолщение зоны сгиба в отсутствие дефектов профиля при минимальном числе переходов.

3.1. Выбор схем действия внешних сил

Стесненный изгиб в роликах является сложным технологическим процессом, сочетающим всевозможные схемы приложения усилий к заготовке, а также их последовательность и характер изменения. На рис. 1.10. представлены схемы действия приложенных к заготовке сил на окончательном переходе, на основе рассмотрения которых построен соответствующий классификатор (рис. 3.1.).

В зависимости от приложенных усилий все схемы разбиваются на пять классов, обозначенных римскими цифрами на рис. 3.1. Классы разбиваются затем на группы, определяющие направление и характер приложенных сил.

Отметим, что в данном классификаторе нами не учтены случаи радиального растяжения внутреннего и наружного контуров (классы III и IV), поскольку такие схемы на практике не реализуются (хотя в классификации операций такие схемы приводятся; см., например, рис. 1.10, взятый из работы [29]). Кроме того, не различаются процессы с приложением радиальных усилий обжима по характеру действия внешних сил ввиду монотонного характера нагружения по контурам. Сделаем еще замечание относительно возможности обобщения разработанного классификатора схем стесненного изгиба на схемы существующих гибочных операций (включая чистый изгиб и гибку с растяжением). Для этого необходимо изменить название класса V и сделать разбивку группы 1 этого класса на подгруппы по знаку действующей силы, группы 2 – по знаку производной силы поджатия по времени. Знаки приложенных сил устанавливаются в зависимости от направления их по отношению к очагу деформации: положительной считается сила, направленная от очага деформации, отрицательной – сила, направленная в очаг деформации.

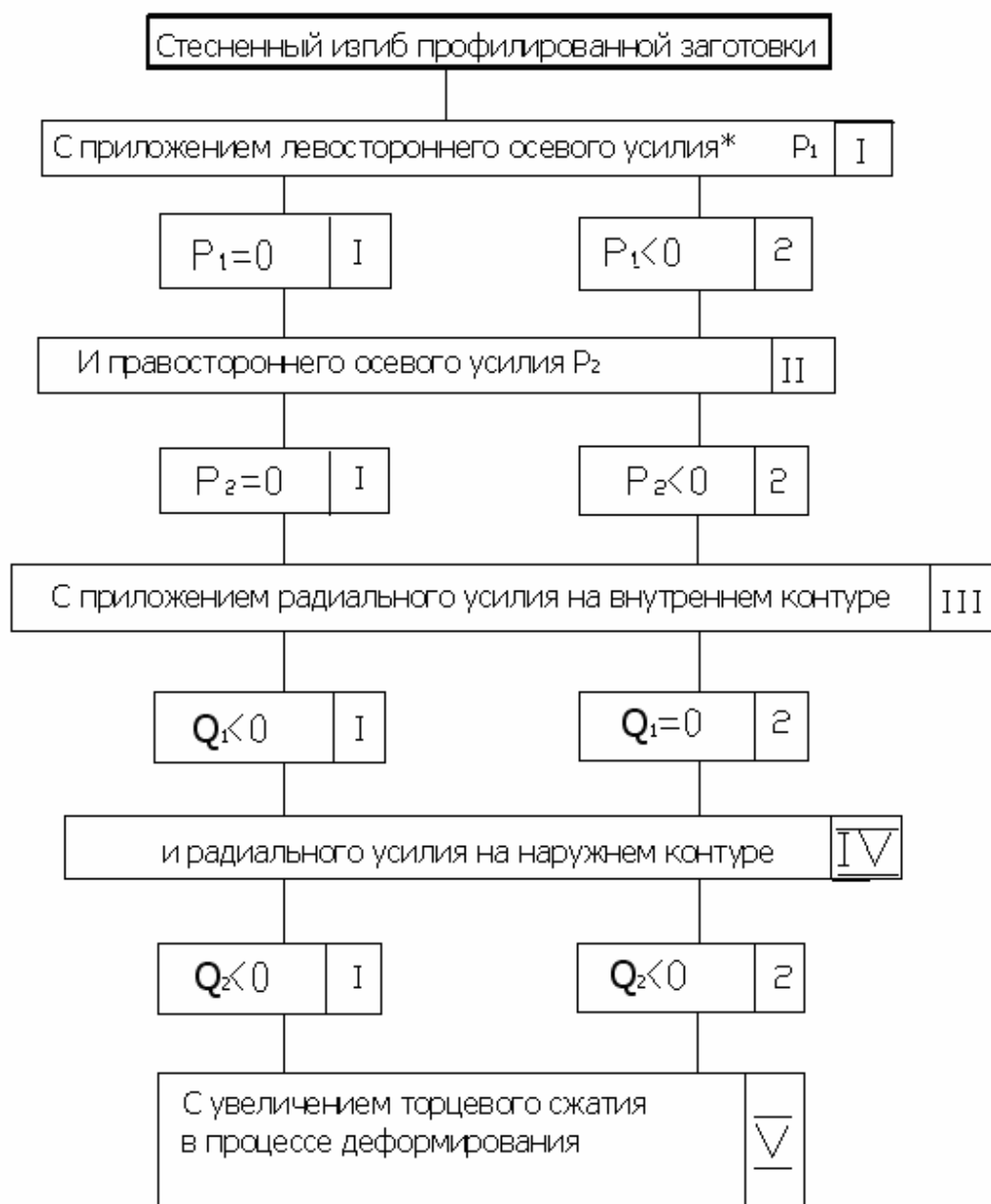


Рис. 3.1. Классификатор схем приложения усилий при стесненном изгибе
(* движение профиля по переходам слева направо)

Рассмотрим классы I и II классификатора. Здесь имеются четыре возможности для комбинаций лево– и правостороннего усилий. Случай $P_1 = 0$, $P_2 = 0$ соответствует гибке прокаткой в отсутствие аксиальных усилий. Возможны, в принципе, комбинации $P_1 = 0$, $P_2 = 0$; $P_2 = 0$, $P_1 < 0$; $P_1 < 0$, $P_2 < 0$. Последняя комбинация представляет собой схему с двусторонним аксиальным сжатием. Данная схема, как это показано в первом разделе, является наиболее предпочтительной, поскольку в очаге деформации реализуется схема, весьма

близкая к схеме всестороннего сжатия, которая повышает пластические свойства материала и позволяет получить большие утолщения и меньший радиус зоны сгиба, т.е. происходит интенсификация процесса формообразования. Следует заметить, что при гибке прокаткой усилия P_1 и P_2 вовсе не обязаны быть равными, поскольку возможно удержание профиля в калибре окончательного формообразования за счет сил трения, возникающих между роликами и заготовкой. В случае небольшого (в пределах упругости) обжима заготовки по толщине без приложения аксиальных усилий происходит вытяжка материала в аксиальном направлении (до 7 %) из-за специфических условий формообразования, связанных с осадкой и раскаткой материала в осевом направлении. В связи с тем, что двустороннее аксиальное сжатие при гибке прокаткой приводит к устранению вытяжки, то в качестве модели заполнения уголка и для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния следует рассмотреть схему плоско-деформированного состояния в зоне сгиба. Дальнейшая классификация по виду радиальных усилий дает четыре схемы, из которых схема III,1–IV,2 (рис. 3.1) практического интереса не представляет, поскольку весьма сложно осуществить посадку внутреннего контура на ролик при свободном наружном контуре в условиях тангенциального сжатия. Остальные три схемы (свободная зона сгиба, посадка на наружный контур и двустороннее радиальное обжатие) могут быть использованы при производстве профилей.

Таким образом, разработанный классификатор позволяет производить анализ различных схем и может использоваться как на стадии исследования процессов, так и в системах автоматизированного проектирования технологических процессов и оснастки.

3.2. Основные допущения при проведении теоретических исследований

Теоретические исследования распространяются на процессы предварительного и окончательного формообразования (собственно стесненный изгиб). При рассмотрении этих процессов приняты следующие допущения:

- к заготовке прикладывается двустороннее аксиальное усилие поджатия, исключаящее вытяжку материала в продольном направлении, так что рассматривается плоское деформированное состояние;
- материал заготовки является несжимаемым и жестко-пластичным;
- рассматривается случай простого нагружения;
- считается справедливой гипотеза «единой кривой»;
- при формообразовании уголковой зоны считается справедливой гипотеза ортогональности: ортогональная сетка продольных и поперечных линий совпадают с направлениями главных деформаций и напряжений в каждой точке деформированной области, при этом условие ортогональности выполняется на любом этапе деформирования;

- геометрические места точек сопряжения прямолинейных и криволинейных участков деформированных волокон суть прямые линии.

Сформулированные выше допущения не охватывают всей совокупности ограничений, присущих той или иной задаче, рассматриваемой в рамках данной работы. В этой связи допущения, имеющие значение лишь для рассмотрения конкретной проблемы, будут в соответствующих местах приведены и обоснованы.

3.3. Изучение напряженно-деформированного состояния при стесненном изгибе в уголкового зоне

При разработке технологии и оборудования для изготовления профилей стесненным изгибом необходимо знание напряженно-деформированного состояния в зоне сгиба, позволяющее сделать последующий переход непосредственно к технологическим параметрам процесса. Для этого были использованы три метода определения напряжений в зоне сгиба: метод прямого интегрирования уравнений равновесия с использованием гипотезы ортогональности [112], метод линий скольжения [113] и метод конечных элементов [114], что было связано с необходимостью сравнения результатов при различных подходах.

3.3.1. Применение *метода прямого интегрирования*

При использовании метода прямого интегрирования [112] введем необходимые геометрические характеристики зоны сгиба (рис. 3.2). Обозначим угол гиба 2α , начальную толщину заготовки S_0 , толщину по биссектрисе угла S_0 . Выберем декартовы координатные оси следующим образом: ось Y направим по биссектрисе угла, а ось X перпендикулярно ей и оси гиба, причем начало координат расположим на срединной поверхности. В выбранной таким образом системе координат необходимо дать описание границ уголкового зоны. Так как приложение торцевых усилий в отсутствие ограничений по внутреннему и наружному контурам придает им некое отклонение от формы дуги окружности, то с целью уточнения конфигурации границ при стесненном изгибе были проведены исследования [115] на швеллерных профилях, изготавливаемых из трапецевидных заготовок длиной 700 мм с основаниями 55 и 62 мм из алюминиевых сплавов с пределом

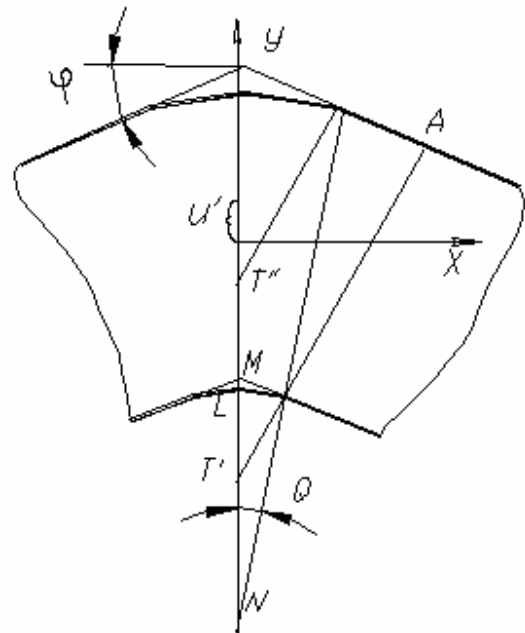


Рис. 3.2. Геометрические характеристики зоны сгиба

текучности от 220 до 450 МПа. Готовые уголки разрезали на 14 равных частей и для каждого изготавливали шлиф, который потом калькировали в масштабе 1:250 с помощью приборов «МИМ–7» и «ЭПД–45» на миллиметровую бумагу. Затем снимали координаты точек каждой кривой, производили обработку результатов с помощью ЭВМ. Блок–схема обработки результатов приведена на рис. 3.3. В качестве характеристики отклонения кривой от окружности брали отношение полуосей аппроксимирующего эллипса, обозначаемое функцией $K(a, h, h_f)$, вид которой установлен в работе [115]:

$$K(a, h, h_f) = \sqrt{\frac{h_f - h \cos a}{h_f^2 - h \cos a}} [1 + \ln(h_f + h)]^{\frac{h-h_f}{h_f}}, \quad (3.1)$$

где h_f – относительная толщина зоны сгиба по биссектрисе угла.

Здесь h – преобразуется к координате Y с помощью выражения:

$$y = 2(h - h_f) / h_f + 1$$

Отметим еще один способ определения значений функции (3.1). Если на поверхности зоны сгиба взять две произвольные точки $(x_{i1} = y_{i1})$ и $(x_{i2} = y_{i2})$ и подставить их в уравнение эллипса, то после решения соответствующей системы алгебраических уравнений можно получить значения полуосей эллипса, а затем, взяв их отношение, получить соответствующее значение $K(a, h, h_f)$ в виде:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2(y_{i1}x_{i2}^2 - y_{i2}x_{i1}^2)}{\sqrt{y_{i1}y_{i2}(y_{i1} - y_{i2})(y_{i1}x_{i2}^2 - y_{i2}x_{i1}^2)}}.$$

Функция $K(a, h, h_f)$ является единой как для описания внутреннего, так и наружного контуров, однако при этом необходимо записывать два уравнения, поскольку процедура отыскания функции делает эти уравнения неинвариантными по отношению к выбору системы координат, в связи с чем кажущаяся возможность записи единого уравнения с эволюционным параметром h не может быть реализована [115]. Адекватность описания может соблюдаться при единой записи граничных условий лишь в случае одновременных трансляции координат и изменении характеристических параметров:

$$x^2 / \kappa^2 + y^2 = (B + h)^2, \quad (3.2)$$

где B – большая полуось аппроксимирующего эллипса.

Отметим, кстати, что в работе [116] закон эволюции параметров кривой задается локоном Аньези, в отличие от более простого случая, приведенного выше, однако и в этом случае для описания внутреннего и наружного контуров должны использоваться различные уравнения.

Приведенные относительно сложные процедуры определения функций геометрических параметров связаны со сложностью изучения геометрических

характеристик зоны сгиба ввиду малости ее размеров. С этим же связана и сложность формулировки граничных условий в задачах стесненного изгиба. Таким образом, уравнение (3.2) позволяет задавать границы контуров как при аналитическом решении, так и при использовании численных методов в случаях свободного формообразования зоны сгиба (в отсутствие радиальных сил).

В соответствии с рис. 3.2, уравнение эллипса, отсекающего на оси Y отрезок u , может быть записано в следующем виде [112]:

$$x = K(a, h, h_f) [(B_1 + B_2)/2 + (B_2 - B_1)/(h_f s_0) u'] \cos q, \quad (3.3)$$

$$y = (B_1 + B_2)/2 + [(B_1 + B_2)/2 + (B_2 - B_1)/(h_f s_0) u'] \sin q, \quad (3.4)$$

где B_1, B_2 – значения больших полуосей эллипсов, соответствующих внутреннему и наружному контурам; θ – текущий угол.

Семейство линий, ортогональных к эллипсам (3.3), (3.4), находится с использованием методов дифференциальной геометрии:

$$[K^2(a, h, h_f) - 1] \ln |l + u| = [1 - K^2(a, h, h_f)] \ln |\cos q| + \ln |\operatorname{tg} q / J|, \quad (3.5)$$

где J – постоянная интегрирования.

В уравнении (3.5) введены обозначения:

$$u = 2u'(h_f s_0), \quad l = (B_1 + B_2)/(B_2 - B_1).$$

Исходя из характера процесса гибки и допущения о том, что упругая и пластическая зоны разделяются в сечении прямой, после решения соответствующих алгебраических уравнений в работе [112] найдено соотношение:

$$q_0 = \operatorname{arctg}[2 \operatorname{tg} a (1 - h_f \cos a) / (2h_f \cos a - 1)], \quad (3.6)$$

где θ_0 – угол, под которым прямая, разделяющая упругую и пластическую области, пересекает ось OX .

Тогда уравнение линий, перпендикулярных к семейству эллипсов (3.3) и (3.4), с учетом (3.6) в пределах пластической зоны можно записать так:

$$\operatorname{tg} q = J(l + u)^{K^2 - 1}. \quad (3.7)$$

Применяя известные тригонометрические соотношения к (3.7), перепишем соотношения (3.3) и (3.4) в виде:

$$x = Kx(l + u) / 2 \sqrt{1 + J^2(l + u)^{K^2 - 1}}, \quad (3.8)$$

$$y = x[l + J(l + u)^{K^2} / \sqrt{1 + J^2(l + u)^{2(K^2 - 1)}}], \quad (3.9)$$

где $x = s_0 h_f / 2$.

Принимая во внимание соотношения (3.8) и (3.9), можно вычислить коэффициенты Ламе для ортогональной сетки. Запишем выражение только для одного из них, а именно H_u , ибо только оно нам потребуется в дальнейшем:

$$Hu = \sqrt{(K^2 x^2 J^2 (l+u)^{4K^2-2} + x^2 (l+u)^{2K^2} [1 + 2J^2 (l+u)^{4K^2-2}]) / [1 + J (l+u)^{2K^2-2}]^3}. \quad (3.10)$$

Уравнения равновесия сводятся к уравнению в частных производных [96]:

$$\frac{\partial s_J}{\partial u} - (s_u - s_J) \frac{\partial}{\partial u} \ln Hu = 0, \quad (3.11)$$

где s_J, s_u – главные значения напряжений вдоль соответствующих ортогональных линий.

Исходя из того, что влияние гидростатического давления на изменение формы мало, а эффект Баушингера игнорируется, функция пластичности зависит лишь от второго инварианта и представляется в виде:

$$s_u - s_J = \frac{K_1}{(1 - m_{13}m_{31})^{\frac{n+1}{2}}} e_J^n, \quad (3.12)$$

где K_1, n – коэффициенты

аппроксимации единой кривой; e_J – натуральная деформация в направлении координаты; m_{ij} – коэффициенты анизотропии, у которых первый индекс показывает направление действия силы, а второй – поперечного сжатия (здесь направление «1» совпадает с касательной к линии «u», направление «3» – перпендикулярно плоскости поперечного сечения профиля).

Из геометрического рассмотрения перемещений в криволинейных координатах, после интегрирования уравнения (3.11) с учетом условий свободного формообразования по внутреннему и внешнему контурам зоны сгиба, а также условия (3.12), получим выражение для напряжения s_u [112]:

$$s_J = \frac{K_1}{(n+1)(1 - m_{13}m_{31})^{\frac{n+1}{2}}} \left\{ \left[\ln \frac{Hu(J, u)}{\sqrt{Hu(J, 1)Hu(J, -1)}} \right]^{n+1} - \left[\ln \sqrt{\frac{Hu(J, u)}{Hu(J, -1)}} \right]^{n+1} \right\}. \quad (3.13)$$

Здесь Hu определяется формулой (3.10).

Формула (3.13) показывает, что величина напряжений в зоне сгиба зависит от анизотропии. Очевидно, радиальные напряжения могут быть найдены из условия (3.12).

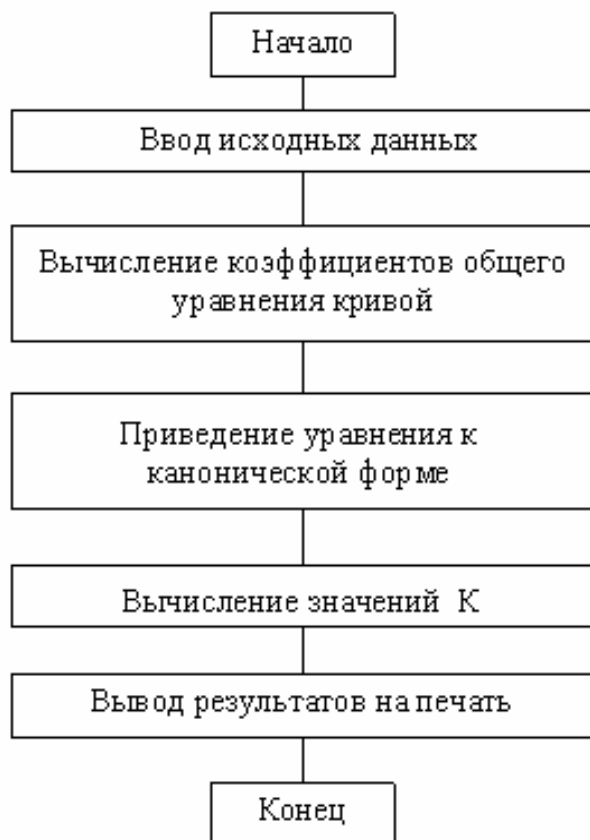


Рис. 3.3. Блок-схема вычисления характеристических параметров кривой

Отметим, что окружные логарифмические деформации определяются формулой:

$$e_J = \ln \left[Hu(J, u) / \sqrt{Hu(J, 1)Hu(J, -10)} \right]. \quad (3.14)$$

Значения окружных деформаций могут использоваться при оценке наклепа наружных слоев заготовки и последующей оценки возможности разрушения.

3.3.2. Применение *метода линий скольжения*

При использовании метода линий скольжения [113] в качестве линий скольжения, ортогональных семейству эллипсов, брали семейство логарифмических спиралей:

$$r = Ae^{\gamma/m}, \quad (3.15)$$

где r – радиус-вектор; A – константа; γ – угол между направлением одного из главных напряжений и биссектрисой угла; m – функция, зависящая от характеристик эллипсов и угла, образованного радиус-вектором спирали и биссектрисой.

Так как линии скольжения пересекаются под углом $\pi/4$, то из рис. 3.4, вычисляя с использованием формул (3.2) и (3.15) разность углов θ_1 и θ_2 , под которыми эллипс и спираль пересекают радиус-вектор, получаем:

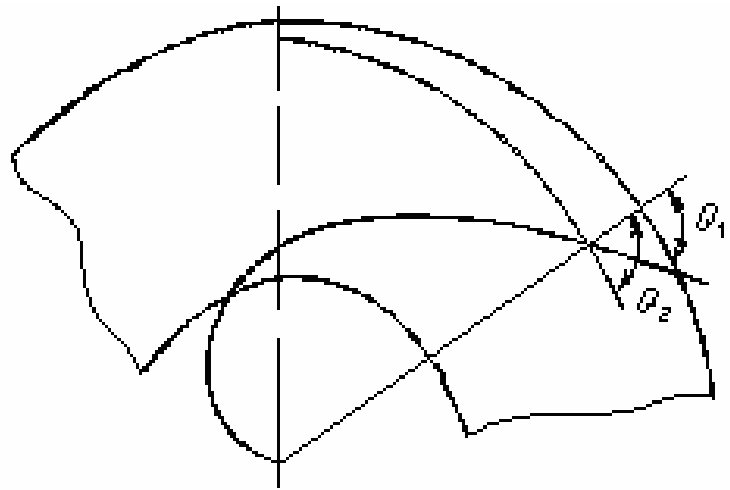


Рис. 3.4. Линии скольжения и характеристики

$$m = \left| 1 + \sqrt{1 - K^2} (\sin j + \cos j) \right| / \left| 1 + \sqrt{1 - K^2} (\cos j - \sin j) \right|, \quad (3.16)$$

где φ – полярный угол.

Тогда, используя уравнения характеристик и условие пластичности, после удовлетворения граничным условиям, получаем формулу для определения тангенциальных напряжений, например, в растянутой зоне [113]:

$$s_J = \frac{2s_T}{m\sqrt{3}} \ln \left[\frac{K^2(B + S_0 h)(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h_f, h)} \cos j)}{K^2(a, h, h_f)(B + S_0 h_f)(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f)} \cos j)} \right]. \quad (3.17)$$

Здесь m определено формулой (3.16).

Для сжатой зоны следует внести соответствующие изменения в условие пластичности. Значения σ_u для растянутой и сжатой зон легко определяются из соответствующих условий пластичности. Положение нейтрального слоя находится из трансцендентного уравнения, являющегося следствием «сшивания» тангенциальных напряжений для растянутой и сжатой зоны:

$$\frac{(B + S_0 h) K^2}{1 + \sqrt{1 - K^2}} = \left\{ B(B + S_0 h_f) / \left[(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f)}) (1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f)}) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (3.18)$$

Очевидно, обычная гибка должна быть частным случаем стесненного изгиба. Именно, при отсутствии торцевого сжатия и контуры зоны сгиба имеют форму окружностей, что следует из формул (3.1) и (3.2), а формулы (3.17) и (3.18) переходят в известные формулы обычной гибки.

На рис. 3.5 и 3.6 представлена составная номограмма распределения напряжений s_j в зоне сгиба для $h_f = 1,2$. Приведенное значение $\bar{s}_j = s_j / s_T$ зависит параметрически от относительного значения большой полуоси $\bar{B} = B / S_0$, половины угла гибки α , а также от координат η и φ . Введены следующие обозначения:

$$t_1 = \frac{\bar{B} + h}{\bar{B} + h_f}, \quad t_2 = 2 \ln \frac{K(a, h, h_f)}{K(a, h, h_f)},$$

$$t_3 = \ln \left[(1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f)}) - 1 \cos j \right] / (1 + \sqrt{1 - K^2(a, h, h_f)}) \cos j],$$

$$S = 2 / (m \sqrt{3}), \quad t = t_1 + t_2 + t_3, \quad s_j = t \cdot S.$$

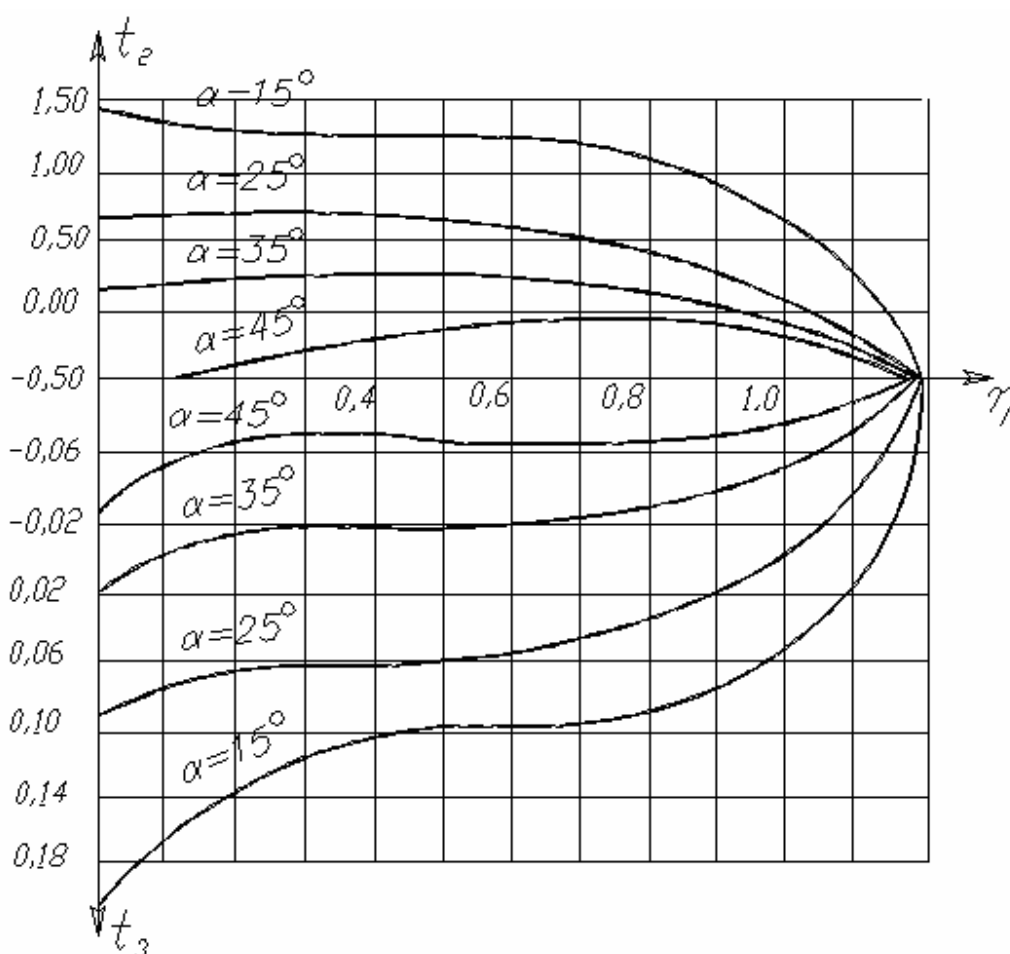
Значение σ_u для заданных координат φ и η легко определяется из условия пластичности и номограммы рис. 3.5 и 3.6. Следует отметить, что напряжения, определенные методом линий скольжения не учитывают анизотропию и упрочнение, что связано с особенностями уравнений характеристик. Полученные решения дают корректные решения в асимптотике и представляют собой обобщение обычной гибки на случай стесненного изгиба.

2.3.3. Применение *метода конечных элементов*

При решении задачи формообразования уголка методом конечных элементов [114] использовали математическую модель, которая включала нелинейные геометрические соотношения, связывающие логарифмический тензор деформации Генки с градиентом вектора перемещения, нелинейные физические соотношения, базирующиеся на ассоциированном законе пластического течения и вариационное уравнение Лагранжа, получаемое из базового вариационного уравнения Гамильтона – Остроградского:

$$\int_V T \bar{\nabla} du dv = \int_{\Omega} T_N du d\Omega,$$

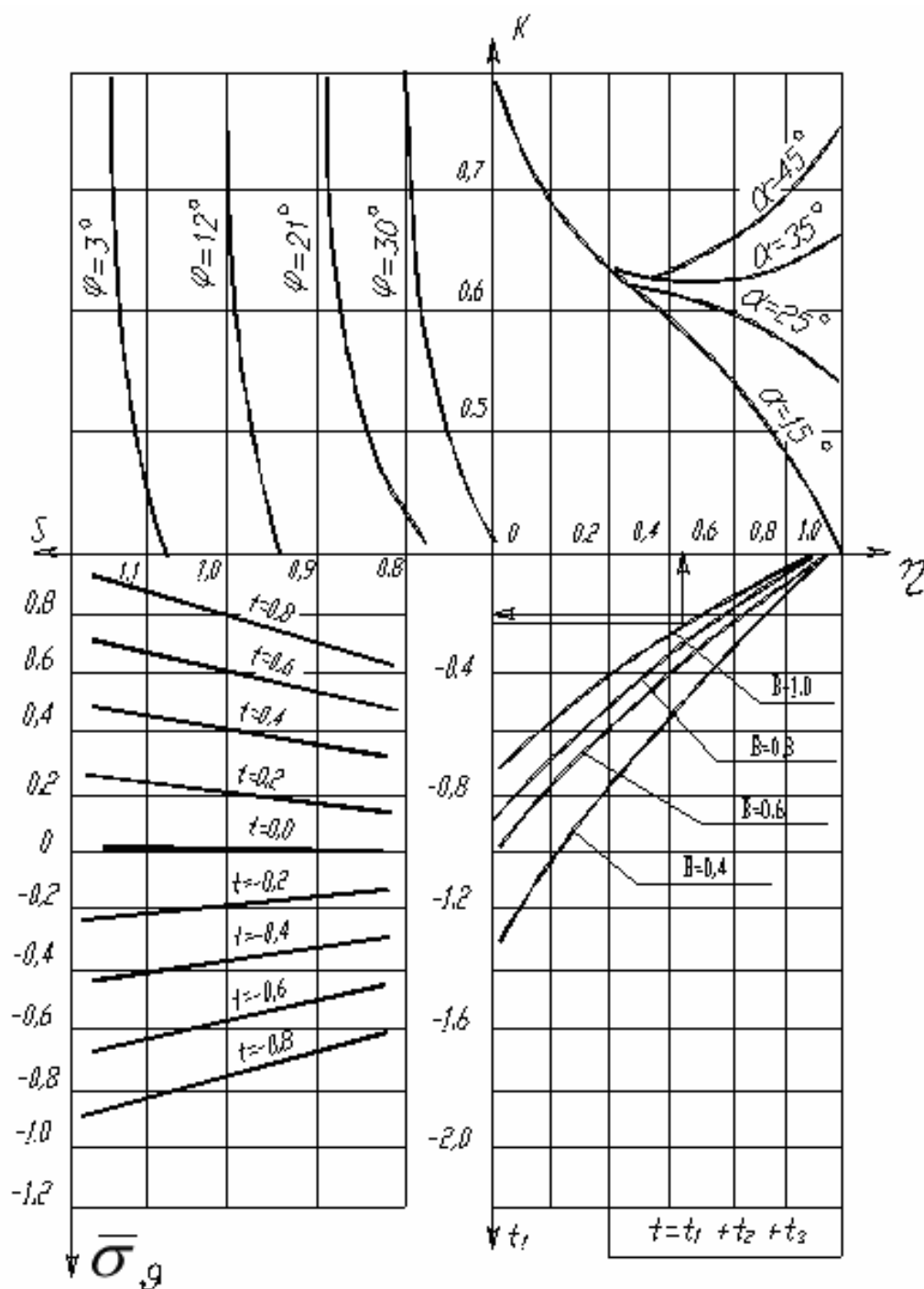
где T – тензор напряжения Коши; T_N – вектор напряжения на поверхности тела Ω с единичной нормалью N ; du – вариация вектора перемещения; $\bar{\nabla}$ – векторный оператор Гамильтона; V – объем тела.

Рис. 3.5. Номограмма для определения t_3 и t_2

Решение нелинейного вариационного уравнения осуществлялось модифицированным методом Ньютона-Канторовича. В качестве конечного элемента использовали четырехугольный девятиузловой элемент.

При составлении программы использовано модульное и структурное программирование. Язык программирования PL-1. В качестве исходных данных использовали характеристики материала заготовки (коэффициент Пуассона, модуль Юнга), диаграмму «напряжение–деформация» в аналитическом или табличном виде, форму рабочего инструмента, коэффициент трения заготовки об инструмент.

В выходных данных ЭВМ выводится на печать следующая информация: напряженно-деформированное состояние заготовки на любом шаге нагружения и после разгрузки в точках интегрирования Гаусса; перемещения и нагрузки узловых точек конечных элементов; область распространения зон, охваченных пластическими деформациями; геометрия заготовки на любой стадии деформирования и после снятия нагрузки; информация о выходе точек детали на поверхность инструмента.

Рис. 3.6. Номограмма для определения $\bar{s}_j$

Процесс осадки исследовали пошаговым методом, начиная со 147 шага, когда заготовка, имеющая практически предельную кривизну в уголовой зоне, находилась в состоянии свободной гибки. Увеличение шага на единицу соответствовало величине осадки на 0,1 мм. На рис 3.7 представлена уголовая зона, разбитая на четырехугольные девятиузловые (узлы условно не показаны) конечные элементы с соответствующей нумерацией. При осадке элементы

деформируются, причем наибольшей деформации подвержены элементы, расположенные в зоне наибольшей кривизны (элементы 5 и 6). Они пребывают в пластическом состоянии и легче подвержены деформированию, чем периферийные элементы 3, 4 и 7, заключенные в роликовый зазор и которые подвержены не изгибу, а лишь сжатию. С увеличением осадки элементы 5 и 6 вытягиваются в направлении биссектрисы угла. С увеличением осадки кривизна наружного контура увеличивается.

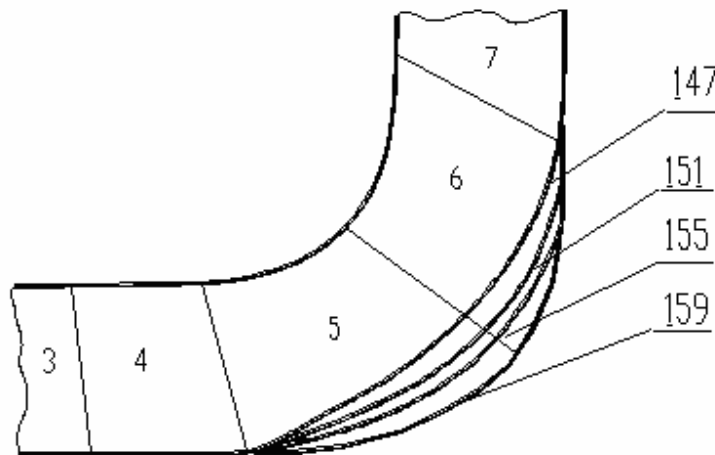


Рис. 3.7. Разбиение зоны сгиба на конечные элементы:
3, ..., 7 – конечные элементы; 147, ..., 159 – шаги нагружения

Если исследовать распределение растягивающего напряжения на наружном контуре по шагам нагружения (по величине осадки), то можно увидеть (рис 3.8), что с увеличением осадки растягивающие напряжения наружного контура снижаются до некоторого значения с небольшой скоростью, после чего происходит их резкое уменьшение до нулевого значения, а затем они резко увеличиваются, но уже будучи сжимающими. Столь резкое изменение тангенциальных напряжений на наружном контуре в зависимости от величины осадки объясняется тем, что на первых этапах осадки происходит постепенное заполнение роликового калибра (шаги от 147 до 158), а затем по мере его заполнения уголкового зона переходит в состояние сжатия (шаг 159). При этом нейтральный слой выходит на наружную поверхность. Дальнейшая осадка приводит лишь к аксиальной вытяжке материала. Отметим, что результаты решения задачи определения напряжений в зоне сгиба с помощью метода линий скольжения хорошо согласуются с данным расчетом методом конечных элементов в отношении напряжений вблизи наружного контура. Однако по внутреннему контуру тангенциальные напряжения, полученные с помощью метода конечных элементов примерно на 30 % меньше тех, что получены аналитически методом линий скольжения. Такое различие в результатах можно объяснить лишь недостатком в исходной постановке задачи для метода конечных элементов, а

именно, задание условие постоянного контакта инструмента и заготовки по внутреннему контуру зоны сгиба, которое уменьшает возникающие в процессе деформирования тангенциальные сжимающие напряжения. В действительности же процесс осадки сопровождается отделением заготовки в области внутреннего контура зоны сгиба от инструмента и последующим увеличением ее кривизны. Происходит как бы «отбрасывание» заготовки в сторону угловой части нижнего ролика. Следует также отметить, что деформации, вычисленные с помощью метода Смирнова–Аляева вблизи внутреннего контура зоны сгиба, также превышают значения деформаций, полученных методом конечных элементов, на величину порядка 20 %, в то время как для наружного контура расхождение не превышает 5 ... 10 %.

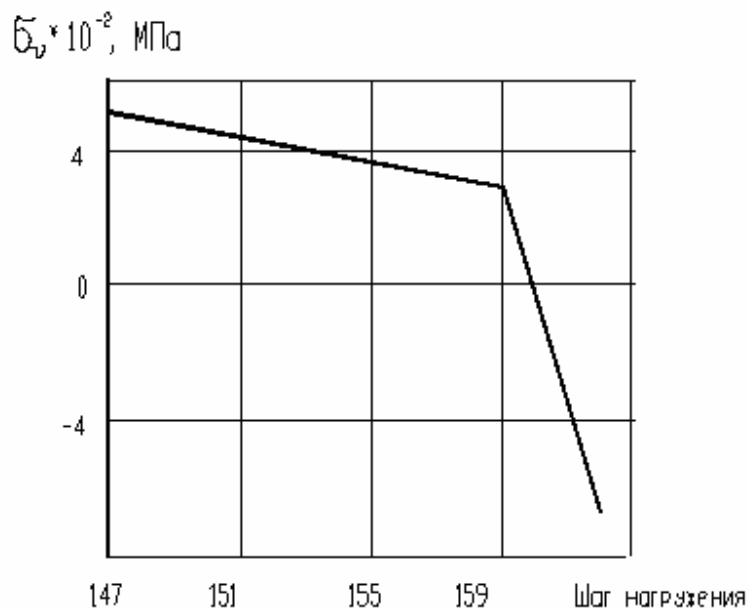


Рис. 3.8. Изменение тангенциального напряжения на наружном контуре по шагам нагружения

Распределение тангенциальных напряжений по наружному контуру по элементам приводится на рис. 3.9, откуда видно, что на первых шагах осадки элементы, удаленные от зоны сгиба (элементы 1 и 2) и находящиеся на стенке профиля, пребывают в сжатом состоянии. При этом элемент 3, непосредственно прилегающий к зоне сгиба, испытывает наибольшее сжатие, а элементы с 4 по 7 (вернее, их области, выходящие на наружный контур) подвержены растяжению, которое весьма неравномерно распределено по углу. Столь прихотливая форма распределения тангенциальных напряжений свидетельствует о более сложном характере деформирования при стесненном изгибе, чем при обычной гибке, где тангенциальные напряжения на наружном контуре должны были бы быть постоянными для всех элементов зоны сгиба. Этот результат хорошо согласуется с формулой (3.13), полученной на основе гипотезы ортогональности. Так, для утолщения 20 % ($\eta_f = 1,2$) значения напряжений отличаются не более, чем на 6 –

13 % (для различных точек наружного контура). При этом оценка (3.6) является справедливой, ибо линии разделения упругой и пластической зон располагаются на уровне четвертого и седьмого элементов. Характер кривых на рис. 3.9 также подтверждает этот факт.

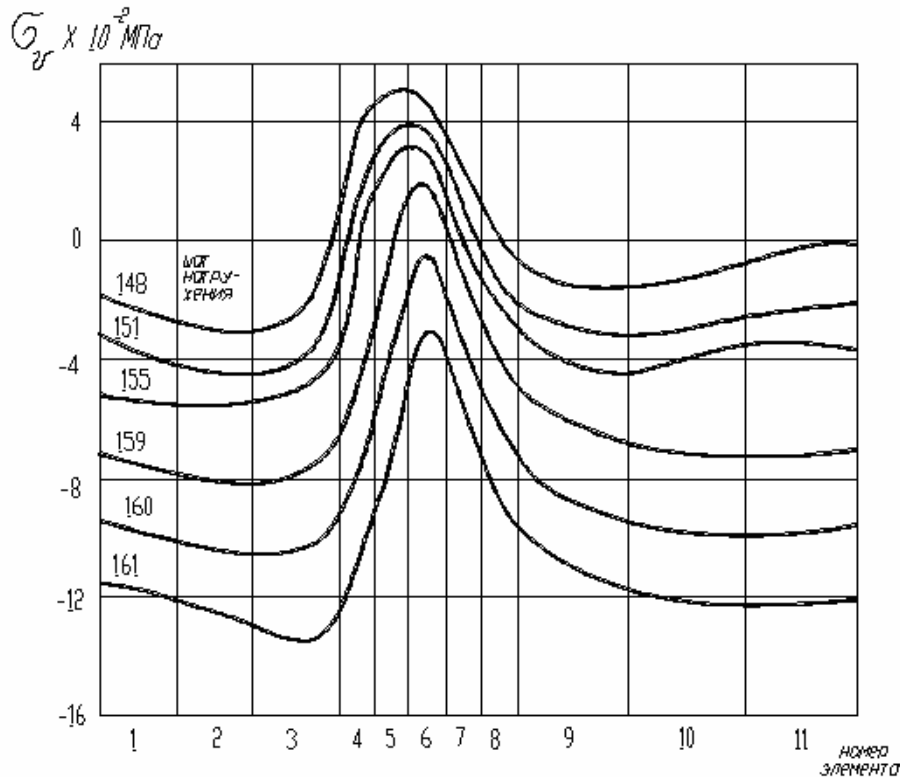


Рис. 3.9. Распределение тангенциальных напряжений на наружном контуре

Другим важным моментом при рассмотрении процесса деформирования является направление главных напряжений в каждой из точек зоны сгиба. Как видно из рис. 3.10 на наружном и на внутреннем контурах совпадение направления тангенциального напряжения с касательной к контуру имеет место лишь вблизи биссектрисы угла. А по мере удаления точек от биссектрисы угла направление главных напряжений существенно отличается от направления касательной к контуру и направления по радиусу (разумеется, для внутреннего и внешнего контуров центры их кривизны не совпадают, если имеет место утолщение материала в зоне сгиба).

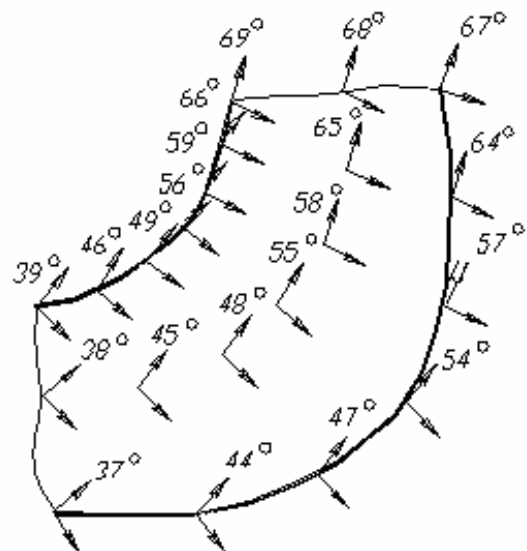


Рис. 3.10. Углы наклона главных напряжений по отношению к оси X

Для внутренних точек зоны сгиба подобная закономерность также имеет место. Из данного рассмотрения следует, что при наличии осадки (торцевого сжатия) направление главных напряжений в переходной зоне от криволинейной области заготовки к прямолинейной области характеризуется наличием сдвиговых деформаций в отличие от обычной гибки, для которой характерна зависимость напряжений лишь от величины радиуса–вектора, соединяющего центр кривизны и текущую точку.

3.4. Изучение условий формообразования в окончательном переходе

В окончательном переходе осуществляется наиболее ответственная часть процесса формообразования. При этом торцевое поджатие реализуется за счет осадки волнообразной заготовки в замкнутом калибре окончательного перехода (рис. 3.11) независимо от конфигурации поперечного сечения профиля.

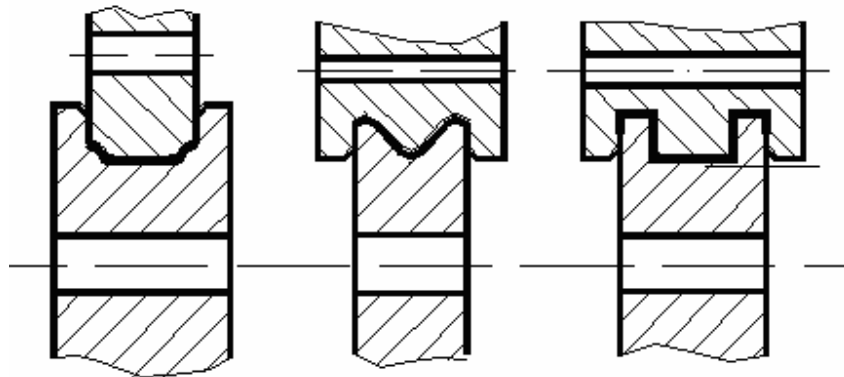


Рис. 3.11. Схема формообразования в роликах

В отсутствие поперечных и продольных (аксиальных) усилий, действующих на профиль по его выходу из пары роликов окончательного формообразования, при осадке в калибре элементы профиля приобретают различные аксиальные деформации, которые приводят к продольному прогибу.

Рассмотрим переход заготовки от предварительной формы к окончательной (рис. 3.12) для корытообразного профиля, обладающего наибольшей общностью по отношению к другим видам профилей. Действительно, в предельных случаях корытообразный профиль с отбортовками дает обычный корытообразный профиль без

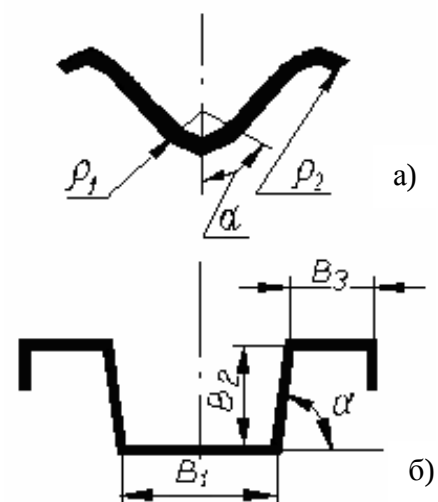


Рис. 3.12. Формы предварительного и окончательного переходов

отбортовок и швеллер с различными с различными углами подгибки. Кроме того, из корытообразного профиля путем продольной разрезки можно получать различные зетобразные и уголкового профили.

При переходе заготовки от предварительной конфигурации (рис. 3.12, а) к окончательной (рис. 3.12, б) в результате осадки заготовки роликами формируется цилиндрическая поверхность (рис. 3.13) с радиусом R:

$$x = x, \quad y = R \cos j,$$

$$Z - R = R \sin j, \quad (3.19)$$

где x, φ – криволинейные координаты.

Для линейчатой поверхности, представленной уравнениями (3.19) на основе рассмотрения геометрических параметров процесса осадки (рис. 3.13) с учетом определения деформации легко вычисляется распределение деформаций по стенке ε_c [117] при выходе профиля из пары роликов окончательного формообразования:

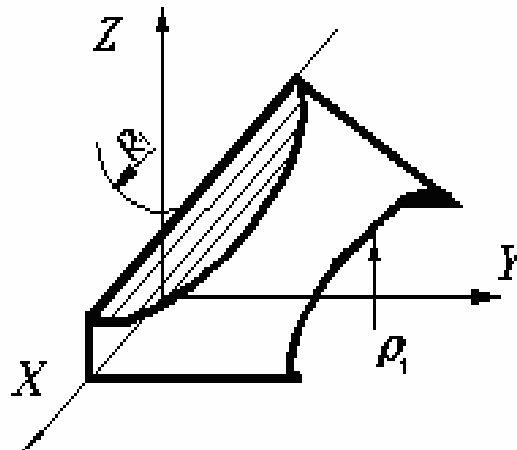


Рис. 3.13. Осадка цилиндрической заготовки

$$\varepsilon_c = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n-1}(2^{2n}-1)B_n}{n(2n+1)!} \left\{ \arccos \left[1 + \frac{r_1}{R_1} (1 - \cos a - 2a \sin a) + \frac{2 \sin a}{R_1} x \right] \right\}^{2n+1}, \quad (3.20)$$

где B_n – числа Бернулли; ρ_1 – радиус кривизны заготовки на предварительном переходе; R_1 – радиус ролика, формирующего стенку.

При формообразовании горизонтальных полок заготовка приобретает форму линейчатой поверхности:

$$x - \frac{b_3}{2} = r \sin(ay/l_0); y = y; Z + H + S_0 = r \cos(ay/l_0), \quad (3.21)$$

где b_3 – ширина горизонтальной полки; l_0 – длина деформированной зоны; r – расстояние текущей точки полки от линиигиба.

Находя коэффициенты Ламе из соотношений (3.21) и используя геометрические соотношения, аксиальные деформации горизонтальных полок ε_n , могут быть определены по формуле [117]:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2} \ln \left[1 + \frac{a^2 r^2}{2R_2 r_2 (1 - \cos a) - r_2^2 (1 - \cos a)} \right], \quad (3.22)$$

где R_2 – радиус ролика, формирующего горизонтальную полку; ρ_2 – радиус кривизны заготовки на предварительном переходе.

Как следует из формул (3.20) и (3.22), величина деформаций зависит как от окончательной и предварительной форм профиля, так и от размеров формирующего инструмента. Наличие аксиальных деформаций свидетельствует о возможности образования продольного прогиба профиля при выходе его из пары роликов окончательного формообразования, если аксиальные деформации профиля не будут одинаковыми по всему сечению профиля, или же сведены к нулю. Следует отметить, что деформации (3.20) и (3.22) получены в предположении, что избыток ширины заготовки выбран таким, что он весь идет на утолщение зоны сгиба. Если же расчетная ширина заготовки завышена на некоторую величину, то аксиальные деформации стенки и полки (и соответственно) будут определяться с учетом формул (3.20) и (3.22) следующим образом:

$$\varepsilon_\phi = \varepsilon_c + \frac{\Delta B}{b_1} \frac{r_1}{r_1 + r_2}, \quad \varepsilon_r = \varepsilon_n + \frac{\Delta B}{2b_3} \frac{r_2}{r_1 + r_2}, \quad (3.23)$$

Тогда продольную кривизну профиля $1/R$ при неравномерных аксиальных деформациях осредненно можно представить в виде [117]:

$$\frac{1}{R_0} = (b_1 \int_0^{b_3} e_r dr - b_3 \int_0^{b_1/2} e_j dx) / (2b_1 b_3 H), \quad (3.24)$$

где H – высота профиля.

Отметим, что кривизна профилей, определяемая формулой (3.24), отличается не более, чем на 12 % от экспериментальных данных, приведенных в работе [5]. Из формулы (3.23) следует, что ширина заготовки оказывает значительное влияние на кривизну профиля.

В процессе формообразования профиля, как показано в работе [117], образованию продольных деформаций соответствует момент M_0 внутренних сил, который определяется формулой:

$$M_0 = [2S_0 K_2 \int_0^{b_2/2} e_j^n dx - (H + Z_c) \int_0^{b_3} e_r^n dr], \quad (3.25)$$

где $K_2 = \sqrt{(1/m_{13} - 2 - 1/m_{31})m_{31}/(1 - m_{13}m_{31})}$, Z_c – центр тяжести сечения профиля.

Для обеспечения прямолинейности профиля должно выполняться условие $M_0 = 0$, однако на практике такие условия реализовать выбором входящих в уравнение (3.25) параметров не удастся. Например, отказавшись от условий сопряжения элементов профиля при проектировании предварительного перехода, мы бы создали неблагоприятные условия для формообразования боковой полки и получили бы на ее внешней поверхности задиры даже при высоком качестве

поверхности формующего ролика. Увеличение размеров роликов также привело бы к необоснованным дополнительным затратам на изготовление оснастки. Кроме того, для получения профилей с одними и теми же габаритными размерами сечения, но с различными геометрическими характеристиками зоны сгиба (внутренний радиус и утолщение) пришлось бы каждый раз изменять размеры роликов, ибо ширина развертки заготовки, определяющая величину утолщения зоны сгиба, входит в определение деформаций. Таким образом, более целесообразным было бы приложение внешней силы, компенсирующей внутренний момент, создающий продольную кривизну заготовки. Поэтому условие прямолинейности профиля можно сформулировать в виде:

$$M_o - M_n = 0, \quad (3.26)$$

где M_n – момент, создаваемый силами внешних устройств, установленных за парой роликов окончательного формообразования.

3.5. Реализация аксиального сжатия в очаге деформации

Установленные в п. 3.4. зависимости геометрии зоны сгиба и продольной кривизны профиля от заданной конфигурации сечения профиля, форм предварительных переходов и размеров формующего инструмента приводят к необходимости поиска путей улучшения качества профилей. Одним из путей преодоления указанных недостатков является согласно классификатору (см. рис. 3.1) схема с двусторонним аксиальным сжатием, которая позволяет приблизить схему действия сил к всестороннему сжатию, сделать распределение аксиальных деформаций равномерным по сечению и устранить аксиальную вытяжку и продольную кривизну. На рис. 3.14 представлена схема реализации двустороннего продольного сжатия. Заготовка 1 подается в пару роликов 2 предварительного перехода, откуда – в пару роликов 3 окончательного перехода, причем соотношение диаметров роликов 2 и 3 позволяет обеспечивать усилие заднего подпора. По выходу из роликов 3 заготовка попадает в разъемную фильеру 4, поджимаемую винтом 5. Фильера 4 вместе с пружиной 6 находится в обойме 7 и обеспечивает подачу усилия переднего подпора в очаг деформации.

3.5.1. Аксиальное сжатие заготовки *в межклетьевом пространстве*

Обеспечение условий динамического равновесия и отсутствия потери устойчивости профиля при аксиальном сжатии является основным требованием к процессу формообразования, которое выполняется, если диаметры роликов предварительного и окончательного переходов отличаются не более, чем на 4 % [118]. Стабилизация усилий поджатия осуществляется за счет проскальзывания профиля при превышении некоторого значения величины аксиального сжатия, зависящего от выбора зазора в роликах и от механических свойств и параметров заготовки на данном переходе.

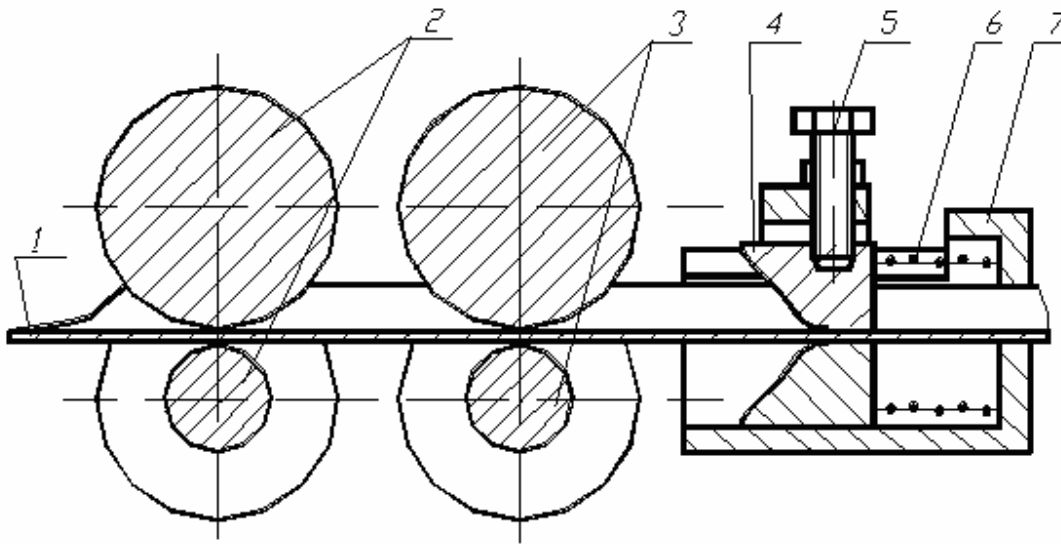


Рис. 3.14. Реализация двустороннего аксиального сжатия

В работе [119] получены соотношения для определения условий проскальзывания при равенстве толщины заготовки зазору в калибре предварительного перехода, размеры которого соответствуют размерам развертки профиля. За счет избыточной ширины заготовки в калибре происходит сжатие заготовки, причем, продольное усилие, необходимое для обеспечения ее проскальзывания, в терминах напряжений запишется следующим образом:

$$\frac{s_a}{s_\tau} = \sqrt{\frac{8}{3S_0B_3^2}} \left\{ r_1^{3/2} \ln \frac{r_1 + S_0}{r_1} + 2r_2^{3/2} \ln \frac{r_2 + S_0}{r_2} - S_0^2 \left(\frac{1}{\sqrt{r_1}} + \frac{2}{\sqrt{r_2}} \right) - S_0^{3/2} f 3\sqrt{2} \right\}, \quad (3.27)$$

где σ_a – продольное напряжение; f – коэффициент трения заготовки и инструмента; B_3 – ширина заготовки.

Отметим, что соотношение (3.27) дает лишь максимальное значение аксиального усилия в случае отсутствия поперечного обжатия при максимально допустимом избытке ширины заготовки.

В том случае, когда происходит обжатие заготовки по толщине ($S_0 > S_k$), аксиальное напряжение определяется соотношением [119]:

$$\frac{s_\tau R \sqrt{2}}{l} + \frac{s_a S_0 l}{f l + 1} \left[\left(\frac{R \sqrt{2}}{l^2 S_0} - 1 \right)^{f l + 1} - 1 \right] = \frac{s_a S_0 l}{2}. \quad (3.28)$$

Здесь введены обозначения:

$$R = \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad l = \sqrt{\frac{2R}{S_0 - S_k}},$$

где R_1, R_2 – радиусы верхнего и нижнего роликов соответственно.

При локальном обжатии заготовки аксиальное усилие легко находится, если использовать теорию прокатки.

Исходя из формулы (3.28), на рис. 3.15 построена номограмма, дающая возможность определять величину аксиального подпора в зависимости от величины зазора в роликах. При построении номограммы были использованы новые переменные, определяемые следующим образом: $t = fl + 1$, $d = S_0 - S_k$, $t = R\sqrt{2}/(S_0 l) = d/(S_0\sqrt{2})$.

Таким образом, уравнения (3.27) и (3.28) полностью определяют условия проскальзывания профиля. Из уравнения (3.26) следует, что $\sigma_a = 0$, когда $S_0 = S_k$. Однако на практике такие условия не реализуются вследствие, с одной стороны, из-за наличия избытка ширины заготовки, а с другой стороны, вследствие собственно упругих свойств ее.

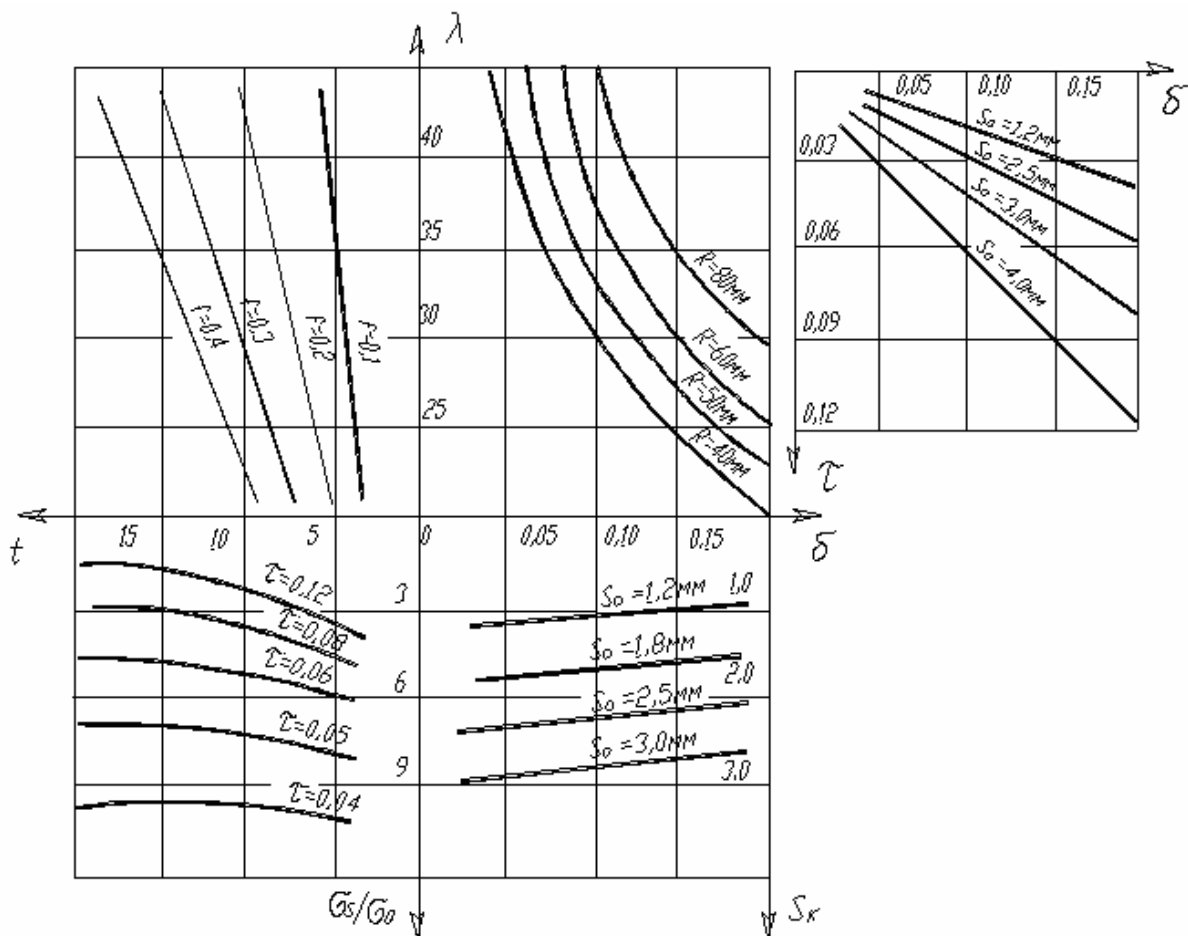


Рис. 3.15. Номограмма для определения настроечных параметров гибки

С целью экспериментального подтверждения разработанных моделей исследовали условия проскальзывания профилей, сечения которых представлены на рис. 3.16, а, г, е. Для этого брали заготовки из материалов 1163 и 1420 длиной

700 мм, сформованные до конфигурации предпоследнего перехода. На каждый профиль брали по 18 заготовок с номинальным избытком заготовки $0,4S_{0п}$. Здесь n – число зон сгиба. На рис. 3.17 представлена схема исследования сил проскальзывания. Один из концов изучаемого образца 4 плющили и помещали в зажим 3, соединенный тросом 2 с динамометром растяжения 1, закрепленным на неподвижной опоре. При подаче образца 4 в ролики 5 регистрировали максимальное показание динамометра. В табл. 2.1 приведены данные измерений после усреднения по трем профилям.

Сравнивая данные табл. 2.1 при обжатии заготовки 0,05 и 0,10 мм с результатами теоретического рассмотрения, представленными формулой (3.28) и номограммой (см. рис. 3.15), следует отметить хорошую сходимость результатов (в пределах 11 %).

Однако усилия, полученные в отсутствие поперечного обжатия, отличаются от теоретических данных более, чем на 30 %. Это объясняется тем, что в эксперименте использована номинальная ширина заготовки, а не максимально допустимая. Следует отметить, что механические свойства материала практически не влияют на условия проскальзывания (по параметру σ_T/σ_a расхождение для материалов, отличающихся по σ_T более, чем на 30 %, составляет всего 6–8 %).

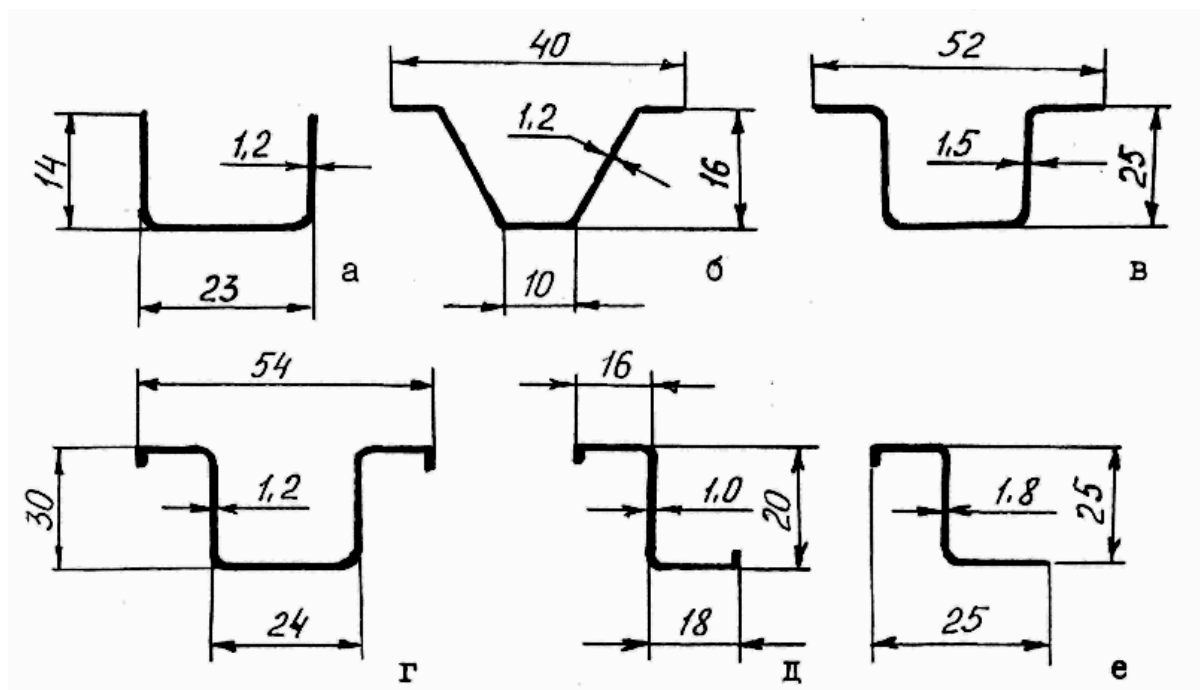


Рис. 3.16. Конфигурация исследуемых профилей

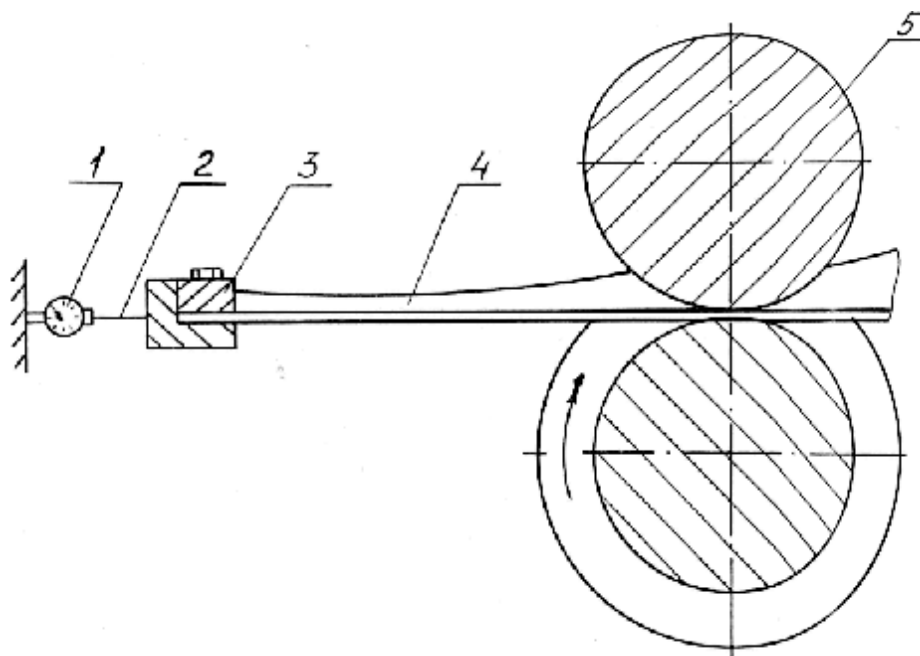


Рис. 3.17. Схема исследования силы проскальзывания профиля

Таблица 2.1

Данные по проскальзыванию профиля в роликах предварительного перехода

Профиль	Материал	$S_0 - S_k$, мм	Усилие, Н	σ_T/σ_α
а	1163	0	330	52
		0,05	960	18,1
		0,10	1340	13,0
	1420	0	370	47,1
		0,05	980	17,7
		0,10	1410	12,3
г	1163	0	580	51,6
		0,05	2100	19,2
		0,10	3210	12,6
	1420	0	890	45,4
		0,05	2360	17,1
		0,10	3150	12,8
е	1163	0	440	51,4
		0,05	110	20,3
		0,10	1560	14,3
	1420	0	510	43,0
		0,05	1220	18,4
		0,10	1640	13,7

Сделаем замечание относительно верхнего предела допустимой силы аксиального сжатия, при превышении которого заготовка теряет устойчивость. В том случае, когда межклетьеовое расстояние и размеры поперечного сечения заготовки позволяют рассматривать ее как стержень или панель, предельные аксиальные силы могут быть определены на основании известных методик [120]. В других случаях вопрос может решаться посредством испытаний.

3.5.2. Предельные параметры *при переднем поджатии*

При реализации переднего поджатия (см. рис. 3.14) верхнюю оценку усилия поджатия нельзя получить из известной формулы Эйлера из-за недостаточной гибкости профиля. Поэтому был использован следующий подход [121]. Элементы профиля рассматривались как пластины с соответствующими условиями закрепления границ. Для горизонтальных полок граничными условиями являлось шарнирное закрепление одного продольного конца и свободное состояние другого. Для боковых полок и стенки – шарнирное закрепление обоих концов. Нагруженные стороны пластин также шарнирно закреплены. Данный выбор граничных условий определен тем, что при стесненном изгибе в рассматриваемом процессе металл находится в состоянии пластического деформирования и малая область трансверсального сечения, находящаяся между роликами, испытывает состояние пластического шарнира.

Для определения допустимых напряжений осевого сжатия элементов профиля решалось основное дифференциальное уравнение устойчивости пластин с соответствующими граничными условиями [121]:

$$\frac{D_i}{S_0} \nabla^4 w_i + s_{ai} \frac{d^2 w_i}{dy^2} = 0, \quad (3.29)$$

где D_i – цилиндрическая жесткость пластины; ∇^2 – двумерный оператор Лапласа; w_i – функция прогиба, зависящая от координат X , Y , первая из которых направлена в поперечном, а другая – в продольном направлении, и относящаяся к элементу i профиля; s_{ai} – допустимые аксиальные напряжения.

Из трех решений, полученных из уравнения (3.29), следует выбрать то, которое соответствует наименьшему значению s_{ai} :

$$s_a = \min \left\{ \frac{l_i p^2 D_i}{b_i^2 S_0} \right\}, \quad (3.30)$$

где λ_1 , λ_2 определяются из обычных алгебраических уравнений, а λ_3 – из системы двух уравнений относительно обычных гиперболических синусов и косинусов [121], и зависящие от соотношения ширины полок b_i и их длин L .

В работе [121] принят параболический закон снижения нагрузки с уменьшением угла подгибки, а также введен коэффициент v для учета эффекта соотношения сторон и возможных ошибок при формулировке гипотез об условиях

закрепления сторон элементов, так что критические напряжения представляются в виде:

$$s_a = \frac{p^2 D}{S_0 L^2} + \left[\min(n \frac{l_i D}{b_i^2 S_0}) - \frac{D}{L^2 S_0} \right] (2a)^2. \quad (3.31)$$

С учетом формулы (3.31) допустимую силу сжатия Р записывается в виде:

$$P_a = \frac{p^2 D_i B_3}{L^2} + \left[\min(n \frac{l_i D_i B_3}{b_i^2}) - \frac{D_i B_3}{L^2} \right] (2a)^2, \quad (3.32)$$

где B_3 – ширина заготовки.

В табл. 3.2 приведены экспериментальные данные исследования профилей типа а, б, г (см. рис 3.16) длиной 300 мм на местную потерю устойчивости. Принимая во внимание стабильность величины P_a для полученных значений продольной силы (колебания не превышают 5 %), можно сделать вывод о весьма удовлетворительном соответствии формулы (3.32) реальным значениям несущей способности профилей. Однако формула (3.32) может использоваться лишь как верхняя оценка допустимых сил, поскольку, как будет показано ниже, столь высокие значения продольной силы сжатия на практике не могут быть достигнуты.

Таблица 2.2

Результаты испытаний профиля на местную потерю устойчивости

Профиль	Материал	Р _а , кН						v
		1	2	3	4	5	Ср.	
а	Д16чТ	10,10	9,80	10,55	9,55	10,35	10,15	1,07
	В95пч	11,15	11,05	10,95	10,40	10,75	10,85	1,08
	1420	11,75	11,30	11,95	12,05	11,70	11,75	1,11
б	Д16чТ	20,45	20,60	19,45	20,45	20,05	20,20	1,10
	В95пч	21,20	21,85	21,45	21,80	21,65	21,60	1,12
	1420	22,95	22,30	22,40	23,15	22,60	22,70	1,12
г	Д16чТ	24,90	24,65	25,30	25,05	25,45	25,05	1,11
	В95пч	26,25	26,70	27,05	26,85	26,40	26,65	1,11
	1420	27,85	28,15	27,40	27,65	28,25	27,85	1,10

Выводы по разделу 3

1. На основе разработанного классификатора схем приложения сил к заготовке при стесненном изгибе и аналитического рассмотрения процесса выявлено, что интенсификация процесса может быть достигнута в схеме с двусторонним приложением сил сжатия.

2. Установлено, что контуры зоны сгиба отличаются от дуг окружностей, причем, мерой этого отличия является функция K , зависящая от углагиба, утолщения зоны сгиба и положения контура; получены уравнения кривых, описывающие контуры зоны сгиба.

3. Исследование напряженно-деформированное состояние в зоне сгиба методами прямого интегрирования, методом линий скольжения и методом конечных элементов показало, что значения напряжений, полученные различными методами, отличаются не более, чем на 30 %. Аналитические модели асимптотически корректны и являются обобщением моделей для обычной гибки на случай стесненного изгиба.

4. Показано, что в очаге деформаций последнего перехода возникает изгибающий момент, приводящий к продольной кривизне профиля, являющейся функцией геометрических и технологических параметров.

5. Для обеспечения стабильного заднего подпора и настройки оборудования разработана модель, устанавливающая связь механических и геометрических характеристик заготовки, профиля и инструмента с создаваемым усилием заднего подпора.

6. Для переднего поджатия получена формула для верхней оценки допустимых усилий, при превышении которых профиль подвержен локальной потере устойчивости.

4. СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И СИЛОВЫЕ ФАКТОРЫ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТОГО ПРОФИЛЯ

Теоретические зависимости, получаемые в работе при ряде допущений, подлежат экспериментальной проверке для обеспечения надежности технологии. Некоторые вопросы процесса формообразования профиля весьма сложны для теоретического анализа, поскольку получение замкнутых решений становится проблематичным. С другой стороны, при введении большого числа упрощающих допущений получаемые решения весьма отдаленно моделируют изучаемый процесс. Данное обстоятельство приводит к необходимости изучения некоторых технологических вопросов экспериментальными методами или их комбинацией с теоретическим расчетом. Хотя общая программа экспериментальных исследований для данной работы была составлена изначально, однако проведение экспериментов осуществлялось в жесткой привязке к проектированию и отладке технологии групп профилей или отдельных их представителей с целью минимизации затрат. Особенность состоит в том, что, как правило, технологическое оснащение пребывает доступным для проведения экспериментальных исследований лишь на стадии технологической отработки процессов, после чего передается в серийное производство заказчика. Даже после проведения активного эксперимента формирующие ролики перетачиваются под приемлемый типоразмер профиля. Для проведения исследований в режиме пассивного эксперимента данные по реализуемым типоразмерам профилей, материалам, числу переходов, схемам формообразования, режимам формовки и настройки оборудования, а также особенностям формообразования отражаются в журналах технологической отработки. Последующая стадия работ заключалась в статистической обработке полученных результатов и их представлении в виде зависимостей и рекомендаций с целью совершенствования технологии.

4.1. Программа и средства экспериментальных исследований

4.1.1. Цель и задачи экспериментальных исследований

Целью исследований является верификация теоретических моделей и установление закономерностей формообразования заготовки в роликах, условий и параметров формообразования профиля, обеспечивающих его надлежащее качество.

Основные задачи исследований:

- оптимизация схем формообразования и определение числа переходов;
- верификация теоретической модели зоны плавного перехода;
- определение энергосиловых параметров и проверка теоретических расчетов;
- исследование специальных вопросов, актуальных для практики.

4.1.2. Основные факторы процесса и применяемые методы

Как установлено в разделах 1 – 3, основными факторами, влияющими на процесс пластического формоизменения заготовки при интенсивном формообразовании являются:

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

В качестве основных методов исследований применялись:

- метод конечных элементов;
- метод тензометрии;
- геометрические методы измерения линейных и угловых величин;
- косвенный метод оценки продольных деформаций;
- методы статистического анализа

4.1.3. Программа исследования и применяемые средства

Программа исследований предусматривала основные этапы:

- Экспериментальное исследование схем формообразования и числа переходов;
- Исследование поведения заготовки в межклетьевом пространстве;
- Исследование энергосиловых параметров процесса формообразования профилей;
- Изучение влияния углов захода на параметры получаемого профиля.

При реализации программы экспериментальных исследований применяли оборудование, инструменты и приборы, указанные в табл. 4.1 – 4.2.

Таблица 4.1

Оборудование, инструменты и приборы для экспериментальных исследований

№	Наименование	Назначение	Примечание
	1	2	3
1.	Ножницы дисковые ДИН-600, гильотинные ножницы	Подготовка заготовок	
2.	Гибочно-прокатные станки ГПС (табл.3.2)	Профилирование заготовок	Нест.
3.	Экспериментальная оснастка	Исследование схем формообразования	Нест.
4.	Устройство для измерения прогибов с индикатором часового типа (ИЧТ)	Измерение прогибов профиля	ГОСТ 577-68 (ИЧТ)
5.	Прибор МПБ-2	Измерение расстояний на элементах профиля, его толщины	
6.	Усилитель тензометрический УТЧ-1	Преобразование сигналов с первичных датчиков	
7.	Осциллограф НЕВА-МТ1	Регистрация параметров	

№	1	2	3
8.	Испытательная машина FP 100/1, разрывная машина Р-5	Механические испытания исходных заготовок и образцов, вырезанных из элементов профилей	
9.	Компьютер Pentium (I – III)	Ведение базы данных по профилям, особенностям их изготовления; расчет и статистическая обработка	
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 межклетьевом пространстве и радиусов скругления роликов	ГОСТ 4126-82

Таблица 4.2

Основные параметры оборудования

№	Модель	Количество клетей, шт.	Межклетье- расстояние, мм	Скорость профили- рования м/мин
	ЭГПС-300	2	250	
1	ГПС-200; ГПС-200М1 ГПС-200М11	4	220	4÷20

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

4.1.4. Применяемые материалы и номенклатура профилей

Выбор материалов для экспериментальных исследований был predetermined номенклатурой профилей, пользующихся спросом на отечественном рынке. Поэтому материалом заготовок являлись преимущественно алюминиевые сплавы, толщиной от 0,5 до 1,5, а также некоторые виды композиционных материалов, применяемых в отрасли авиастроения. В партиях поставляемых материалов производились выборочные испытания стандартных образцов на растяжение с помощью разрывной машины Р-5. Результаты испытаний обычно не выходили за пределы, установленные ГОСТ или ТУ.

Номенклатура исследуемых профилей определялась преимущественно типоразмерами профилей, применяемых для производства летательных аппаратов в качестве элементов силового набора планера летательного аппарата. Некоторые типоразмеры профилей были приняты для исследований в качестве перспективных образцов для самолетов вертикального взлета.

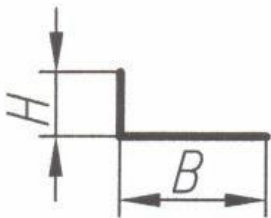
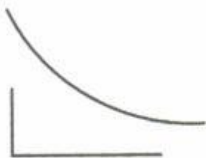
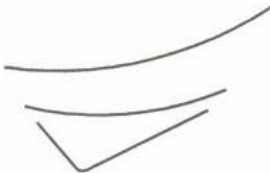
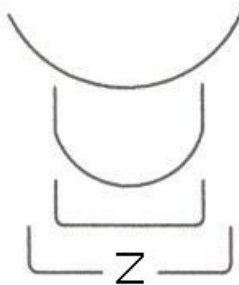
4.2. Схемы формообразования при стесненном изгибе

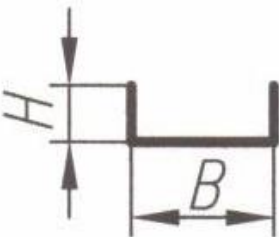
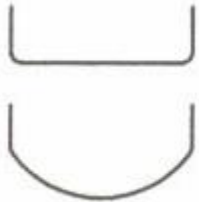
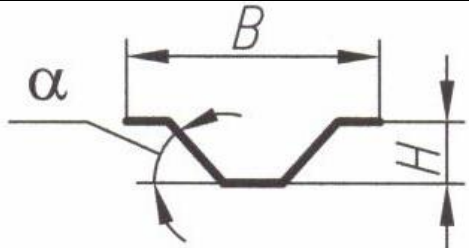
Качественный профиль с максимально возможным утолщением материала по углам характеризуется отсутствием внутренних дефектов и внешних дефектов поверхности, высокой точностью выполнения форм и сечений. Высокая эффективность технологии достигается за счет уменьшения числа переходов, простоты оснастки и настройки ее. Схема формообразования определяет конфигурацию заготовки на предварительных переходах.

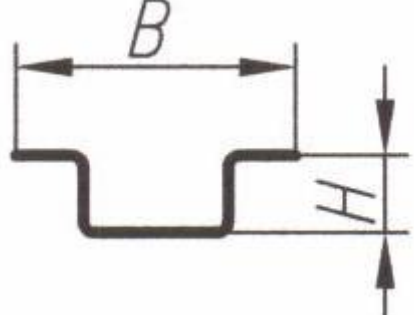
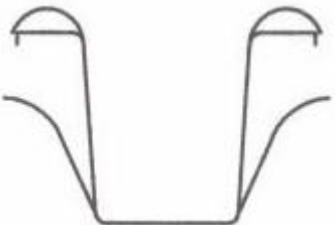
Целью отработки схем формообразования являлась минимизация числа технологических переходов. С этой целью были опробованы 22 схемы формообразования профилей высотой до 30 мм, шириной до 54 мм, толщиной до 2 мм из алюминиевых сплавов, для чего было изготовлено более 50 комплектов оснастки. Эскизы переходов и характеристики схем приведены в табл. 4.3. Анализ и количественные оценки указанных схем даны в работах [122 – 128]. Установленное количество переходов и аналитическое описание схем переходов приведено в п. 4.3 работы.

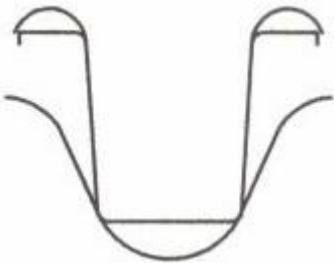
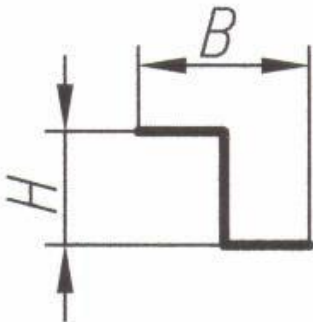
Таблица 4.3

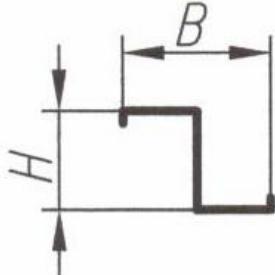
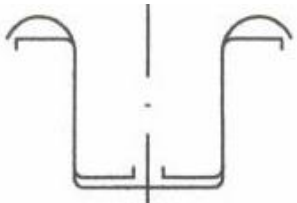
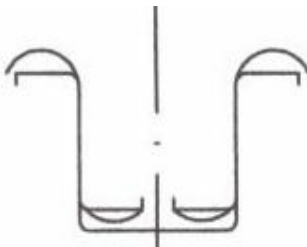
Выбор схем формообразования профилей стесненным изгибом

№ схемы	Эскиз	Характеристика схемы
1	2	3
1.		Уголок
1.1.		Два перехода. Поводки, скрутка.
1.2.		Два – три перехода. Заклинивание профиля в калибре, намотка на ролик.
1.3.		Три – четыре перехода. Симметрия формообразования, качественная отформовка. Четвертый переход – разрезка.

1	2	3
1.4.		Три перехода. Отсутствие скрутки, качественная зона сгиба.
2.		Швеллер
2.1.		Два перехода. При $B/H < 1$ наблюдается волнистость крайков ($S_0 < 1\text{мм}$)
2.2.		Три перехода. Простота инстру- мента, стабильность заго- товки.
2.3.		Три перехода. Схема обратная. Сложность инструмента. Применимость при $B/H > 1$.
3.		Корытообразный профиль, $\alpha < \pi/2$

1	2	3
3.1.		Два перехода. Закатка кромок. Увеличенный прогиб профиля.
3.2.		Два перехода. При $\alpha > 70^\circ$ $H > 30S_0$ – кромковая волнистость.
3.3.		Три перехода. Стабильность процесса, симметричность, простота инструмента. Возможна обратная схема.
4.		Корытообразный профиль с отбортовками.
4.1.		Три перехода. Кромковая волнистость, прогиб профиля.

1	2	3
4.2.		Три перехода. Подрезание кромок при входе во второй переход.
4.3.		Четыре перехода. Симметричность. Плавность переходов, высокое качество. При $B/H > 1$ возможно применение обратной схемы.
5.		Зетовый
5.1.		Три перехода. Скрутка.
5.2.		Три перехода. Задиры на поверхности. Скрутка.

1	2	3
5.3.		Четыре перехода. См. №3.3 табл.4.6. Удовлетворительное качество. Иногда скрутка после резки.
6.		Зетовый профиль с отбортовками
6.1.		Пять переходов. Три перехода из № 4.3 табл. 4.6. Прерывание процесса, закатка нижней кромки.
6.2.		Шесть переходов. Три перехода из № 4.3 табл.4.6. Слишком большое число переходов, прерывание процесса.
6.3.		Три перехода. Кромковая волнистость.
6.4.		Четыре перехода. Благоприятные условия формообразования. Хорошее качество профиля.

Отметим особенности двух схем для формообразования уголкового профиля: схемы 1.2 и 1.4 отличаются тем, что в первом случае неравнополочный уголок формируется из симметричной заготовки, в то время как во второй схеме на предпоследнем переходе заготовка формируется исходя из условий равенства деформаций по кромкам [129], что предотвращает скрутку.

Отработку схем формообразования проводили на станках серии ГПС-200 и их модификаций в отсутствие преднамеренного задания аксиальных сил, которые существенно влияют на определение схем формообразования, хотя в большей мере это относится к методу интенсивного деформирования [130], чем к стесненному изгибу.

Кроме выявленного числа переходов, необходимых для формовки сечения профиля, установлены также следующие правила проектирования схем формообразования:

- 1) Проектирование переходов следует осуществлять последовательно в направлении от готового профиля к первому переходу;
- 2) Окончательный переход надлежит составлять по чертежу профиля окончательной геометрии без учета пружинения;
- 3) Форма профилированной под стесненный изгиб заготовки должна иметь углы наклона полки и проекции полки на горизонтальную плоскость такими же, как на профиле.

Полученные результаты включены в технологические рекомендации [131 – 134], методические материалы по проектированию инструмента [135], а также в РТМ [127].

Ввиду малых габаритных размеров конечного сечения профиля отработанные схемы формообразования обычно не приводят к существенным нарушениям процесса в диапазоне толщин материала от 1,0 до 2,5 мм. При уменьшении толщины материала следует принимать определенные технологические меры, которые отчасти базируются на соотношении протяженности зоны плавного перехода заготовки и соответствующего межклетьевого расстояния профилигибочного станка.

4.3. Формализация схем формообразования и число переходов

Качественный профиль с утолщением материала по углам характеризуется отсутствием внутренних и внешних дефектов поверхности, высокой точностью выполнения форм и сечений.

Схему формообразования определяют исходя из числа переходов и конфигурации сечения профиля, обычно с учетом особенностей профилигибочного оборудования [124, 132]. Число переходов для стесненного изгиба определяется на основе экспериментальной отработки технологии формообразования (см. разд. 4) и для типовых профилей установлено [136, 132, 131], что количество переходов, которое следует применять, составляет для:

- § уголкового неравнополочного профиля – 3 (или 4 – при получении из швеллера с разрезкой, совмещенной с формообразованием);
- § швеллерных – 2–3 перехода;

- § корытообразных ($\alpha < \pi/2$) – 2 (3) перехода (для получения зетообразных профилей с разрезкой – 3 (4));
- § корытообразных с отбортовками – 4 перехода (с разрезкой – 5);
- § зетообразных с двумя отбортовками – 4 перехода;

Расчет конфигураций (рис. 4.1, а, б) для **уголковых** профилей ведется по формулам [137]:

$$\sin(B_3/(2\rho_1)) = \sqrt{B^2 + H^2}/(2\rho_1), \quad (4.1)$$

$$\gamma = B_3/\rho_1, \quad \theta_2^2 = 2\arctg\left[\frac{\sin \gamma/2}{B/H + \cos \gamma/2}\right], \quad (4.2)$$

$$\theta_1^2 = \pi/2 - \theta_1^2, \quad \theta_1^1 = (\gamma - \theta_1^2)/2, \quad \theta_2^1 = (\gamma - \theta_1^1)/2, \quad (4.3)$$

где B_3 – ширина заготовки; ρ_1 – радиус кривизны заготовки; B, H – габаритные размеры уголка; γ – центральный угол; $\theta_1^1, \theta_2^1, \theta_1^2, \theta_2^2$ – соответствующие углы подгибки на первом и втором переходах.

Для **швеллерного** профиля (рис. 4.1, в) расчет конфигураций ведется по формулам:

$$\rho = b_1/2, \quad l_n = (B_3 - \pi/\rho)/2, \quad (4.4)$$

где ρ – радиус кривизны; b_1 – ширина стенки; l_n – длина прямолинейного участка; B_3 – ширина заготовки.

Для **корытообразных профилей с углами** $\alpha = \pi/2$ без отбортовок (рис. 4.1, г) и с отбортовками (рис. 4.1, д) расчет ведется по формулам:

$$\rho_1 = b_1/2, \quad \rho_2 = b_3/2, \quad l_n = [B_3 - \pi(\rho_1 + \rho_2)]/2, \quad (4.5)$$

где ρ_1, ρ_2 – радиусы кривизны; b_1, b_3 – ширина элементов профиля.

Для **корытообразных профилей с углом подгибки** $\alpha \neq \pi/2$ (рис. 4.1, е) и для предварительных переходов в схемах рис. 4.1, б, г, д, е расчет следует вести по формулам [127]:

$$X_k = [B_3/2 - \alpha_k/(57,3 \sin \alpha_k)(b_1/2 + b_3) - b_2] / \left(\frac{\alpha_k \operatorname{ctg} \alpha_k}{57,3} - 1 \right), \quad (4.6)$$

$$\alpha_k = \arcsin \left\{ \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{\alpha_k}{n-1} \right) + \frac{k}{n-1} \sin \alpha \right] \right\}, \quad (4.7)$$

$$\rho_1 = \frac{b_1}{2 \sin \alpha_k}, \quad \rho_2 = \frac{b_3 + X_k \sin \alpha_k}{\sin \alpha_k}, \quad (4.8)$$

где X_k – расстояние между верхней точкой боковой стенки на готовом профиле и точкой сопряжения; α_k – угол подгибки в k -ом переходе, определенные в работе [136].

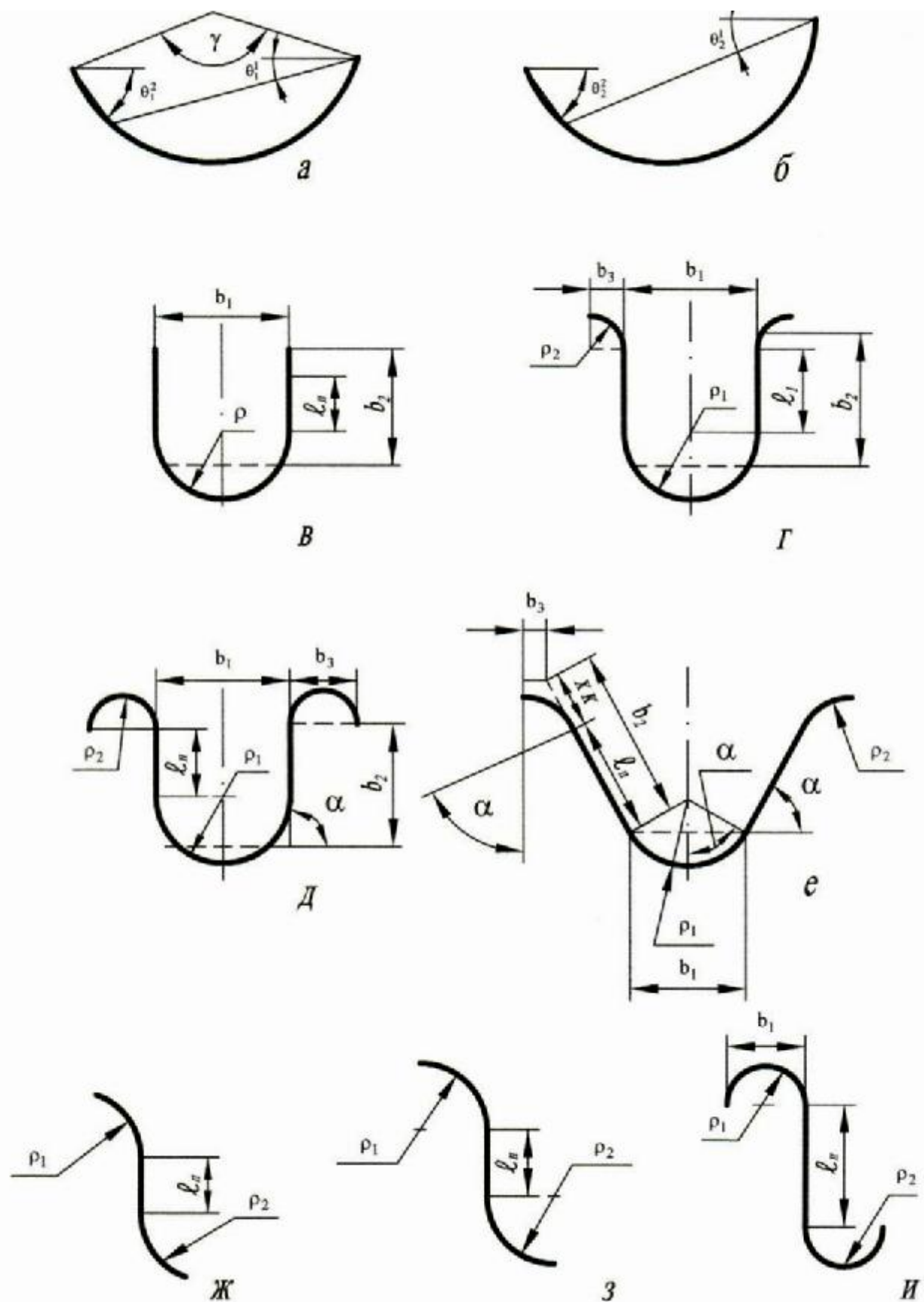


Рис. 4.1. Конфигурации профилированных заготовок

Для **зетовых** профилей (рис. 4.1, ж, з, и) расчет конфигураций надлежит вести по формулам [127]:

$$\text{ж) } r_1 = b_1, r_2 = b_2, l_n = B_3 - (b_1 + b_2)p / 2; \quad (4.9)$$

$$\text{з) } r_1 = 0,6b_1, r_2 = 0,6b_2, l_n = B_3 - (b_1 + b_2)p / 2; \quad (4.10)$$

$$\text{и) } r_1 = b_1/2, r_2 = b_2/2, l_n = B_3 - (b_1 + b_2)p / 2. \quad (4.11)$$

В других случаях при разработке форм предварительных переходов следует соблюдать условия:

- § плавности сопряжения криволинейных и прямолинейных участков заготовки;
- § выбор углов подгибки в соответствии с работой [136];
- § ширину заготовки брать с учетом избытка материала для осуществления стесненного изгиба.

Формулы (4.1) – (4.11) получены на основе экспериментальных исследований; расчетные зависимости и технические решения по производству профилей для авиастроения отражены в авторских свидетельствах на способы формообразования [136, 137, 138, 139, 140], причем, в работе [137] описан способ изготовления зетового профиля из корытного при совмещении формообразования и продольной резки в роликах.

4.4. Протяженность зоны плавного перехода

При разработке технологии стесненного изгиба во избежание переформовки заготовки следует выбирать параметры переходов таким образом, чтобы зона плавного перехода перед текущим (актуальным) переходом не накладывалась на предшествующий период во избежание появления дефектов профиля и необоснованно завышенных энергетических затрат [90]. С другой стороны, при проектировании оборудования чрезмерно большое межклетьевое расстояние приводит к завышенной массе и габаритам технологического оборудования, предназначенного для реализации технологии. Умение априори вычислять размеры зоны плавного перехода позволяет вести процесс проектирования оборудования и роликовой оснастки оптимальным образом.

В работах [141, 142] для процессов стесненного изгиба показано, что полная энергия деформирования W заготовки на предварительном переходе складывается из работы W_y , производимой изгибающим моментом, работы подсадки полки W_n и работы W_B , создаваемой продольной силой [141]:

$$W = W_y + W_n + W_B = \frac{1}{4} \sigma_T S_0^2 \theta \left(2 - \frac{r}{R} \right) + \frac{1}{6} \sigma_T b^3 \left(\frac{d\theta}{dy} \right)^2, \quad (4.12)$$

где r , R – радиусы заготовки на предшествующем и актуальном переходах соответственно; b – ширина деформируемого участка профиля.

В соответствии с предположением о минимальной энергии произведена

минимизацию функционала с подынтегральной функцией (4.12) в предположении заданной относительной длины $\bar{L}$, так что на первом этапе решена задача с неподвижными концами. На втором этапе определена длина $\bar{L}$ из дополнительного условия через геометрические характеристики заготовки и технологической оснастки. Из уравнения Эйлера – Лагранжа с соответствующими граничными условиями определяется функция $\theta(y)$:

$$\theta(y) = \frac{ky^2}{2} + \left(\frac{\theta_n}{S_0 \bar{L}} - \frac{k \bar{L} S_0}{2} \right) y + \theta_0, \quad (4.13)$$

где θ_0, θ_n – углы подгибки на предшествующем и актуальном переходах; $k = 3S_0(2 - r/R)/4b^3$.

Из условия сопряжения участков профиля с учетом формулы (3.13) получено:

$$\bar{L} = \sqrt{\frac{8b^3 \theta_n}{3(2 - ж)}}, \quad (4.14)$$

где $ж = r/R$.

Формула (4.14) представляет собой частный случай более общей зависимости, полученной позже в работе [365].

На рис. 4.2 даны в логарифмическом масштабе зависимости протяженности зоны главного перехода от угла θ_n при обычной гибке ($ж = 1$) и при стесненном изгибе для швеллерного профиля 14x23x1,2 мм. При малых углах подгибки влияние торцевого поджатия невелико. С увеличением угла подгибки оно становится значительным, при этом имеет место хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных.

Использованная здесь методика определения протяженности зоны плавного перехода была применена и для разработанного в 90-е годы метода интенсивного деформирования, имеющего существенные отличия от стесненного изгиба, в особенности в отношении схем формообразования, не предусматривающих обязательной осадки волнообразной заготовки.

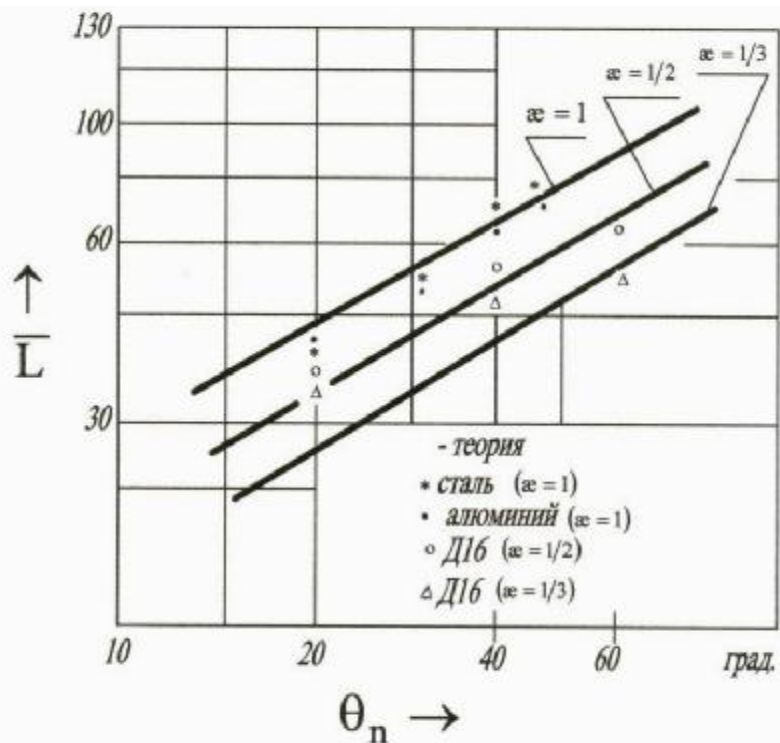


Рис. 4.2. Протяженность зоны плавного перехода при стесненном изгибе

4.5. Силовые параметры процесса формообразования профиля

При проектировании оборудования и оснастки необходимо знать энерго-силовые характеристики процесса. Процесс деформирования рассматривается состоящим из предварительного формообразования и окончательного (собственно стесненный изгиб), причем силовые характеристики определяются на основе вычисления работы формообразования каждого из элементов профиля с использованием свойств аддитивности работы [144]. Рассматривается обобщенная конфигурация профиля (рис. 4.3-4).

При формообразовании горизонтальных полок шириной b_3 на предварительных переходах заготовка имеет форму линейчатой поверхности, а потому, применяя метод верхней оценки, после интегрирования работу формообразования можно представить в виде [144]:

$$A_1 = \frac{S_0 B k_1}{n+2} \left(\frac{\alpha}{\bar{L} S_0} \right)^{n+1} b_3^{2+n}, \quad (4.15)$$

где B – длина профиля; k_1, n – коэффициенты аппроксимации «единой кривой»; $\bar{L}$ – длина зоны деформирования, определяемая формулой (4.14).

Для боковых полок работа A_2 вычисляется аналогично:

$$A_2 = \frac{S_0 B k_1}{n+2} \left(\frac{\alpha}{\bar{L} S_0} \right)^{n+1} b_2^{2+n}, \quad (4.16)$$

где b_2 – ширина боковой полки профиля.

Работа формообразования уголка с учетом логарифмической деформации и применения процедуры интегрирования удельной работы представляется следующим образом:

$$A_3 = 2B \cdot k_1 \cdot S_0 \cdot m \int_0^{h_f} \left(\ln \frac{l+u}{l} \right)^{n+1} du, \quad (4.17)$$

где m – число зон сгиба профиля; λ – функция геометрических параметров зоны сгиба.

Работа осадки стенки A_4 дается формулой:

$$A_4 = 2B k_1 R_1 \int_0^{b_1/2} \arccos \sqrt{\frac{R_1^2 - x^2}{R_p^2}} dx, \quad (4.18)$$

где R_p, R_1 – радиусы ролика и заготовки соответственно; b_1 – ширина стенки; x – переменная интегрирования.

Работа упругого обжатия заготовки A_5 в клети окончательного формообразования находится, исходя из работы [119]:

$$A_5 = \frac{B(S_0 - S_k)}{S_0} \frac{\sigma_T}{f\lambda} \left[\sqrt{2R_1(S_0 - S_k)}(1 + f\lambda) - 2X_n \right] (2b_3 + b_1 + 2b_2 \cos \alpha), \quad (4.19)$$

где S_k – зазор в калибре; f – коэффициент трения.

Здесь λ определяется таким же выражением, что и в формуле (4.17), а ве-

личина X_H находится из трансцендентного уравнения:

$$\frac{2}{1 - f\lambda} = \left[\frac{\bar{X}_H + \lambda}{\lambda} \right]^{\frac{1}{f\lambda}} + \left[\frac{\bar{X}_H + \lambda}{\sqrt{2R_1(S_0 - S_K)} + \lambda} \right]^{-\frac{1}{f\lambda}}. \quad (4.20)$$

Тогда суммарный крутящий момент определяется формулой [144]:

$$M \approx \frac{R_1}{B} \sum_{i=1}^5 A_i, \quad (4.21)$$

где A_i определяется соответственно одной из формул (4.15) – (4.19).

Распирающее усилие в роликах окончательного формообразования с учетом порядка входящих составляющих определяется формулой [144]:

$$P_N = \frac{\sigma_T}{f\lambda} \left[\sqrt{2R_1(S_0 - S_K)}(1 + f\lambda) - 2\bar{X}_H S_0 \right] (b_1 + 2b_2 \cos \alpha + 2b_3), \quad (4.22)$$

где X_H определяется формулой (4.20).

В работе [119] по формулам (4.21) и (4.22) построены номограммы для удобства использования в работе.

С целью получения фактических данных об энергосиловых параметрах стесненного изгиба исследовали зависимости распирающего усилия, крутящего момента на валах, токовой нагрузки электродвигателя и составляющих усилий правки для типовых профилей (рис. 4.3, табл. 4.4) из материалов Д16 (Д16М и Д16Т), В95, 1420 (1420ТГ) толщиной от 0,8 до 2 мм. Такие факторы, как смазка, шероховатость инструмента, скорость профилирования были исключены из числа варьируемых, так как их влияние изучено достаточно полно в работах других авторов [16, 145]. Основным объектом исследования был только окончательный переход, поскольку, как показали постановочные эксперименты,

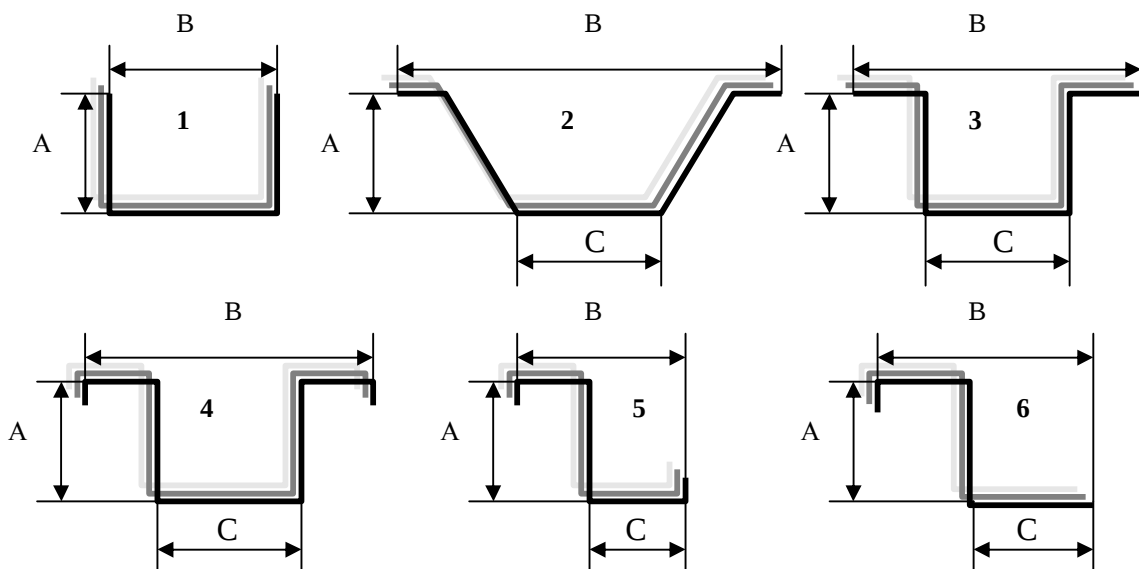


Рис. 4.3. Поперечные сечения исследуемых профилей

значения энергосиловых параметров на предварительных переходах составляет не более 3 – 5% от энергосиловых параметров на окончательном переходе. Исследования проводили на опытном станке ЭГПС–350, имеющем широкий диа-

пазон регулировок и оснащенном необходимым комплектом технологического инструмента и аппаратуры для измерения силовых параметров (рис.4.4).

Таблица 4.4

Соответствие геометрических параметров размерным величинам

Параметр	Номер профиля согласно рис. 4.3					
	1	2	3	4	5	6
A, мм	14	16	25	30	20	25
B, мм	23	40	52	54	34	25
C, мм	—	10	32	24	18	15
S*, мм	1,2	1,2	1,5	1,2	1,0	2,5

* – толщина стенки профиля

Использовали электротензометрический метод измерения с ультрафиолетовой регистрацией сигналов на фотобумаге. Аппаратурой для измерений были усилитель тензометрический на несущей частоте УТЧ–1 и светолучевой осциллограф НЕВА–МТ1.

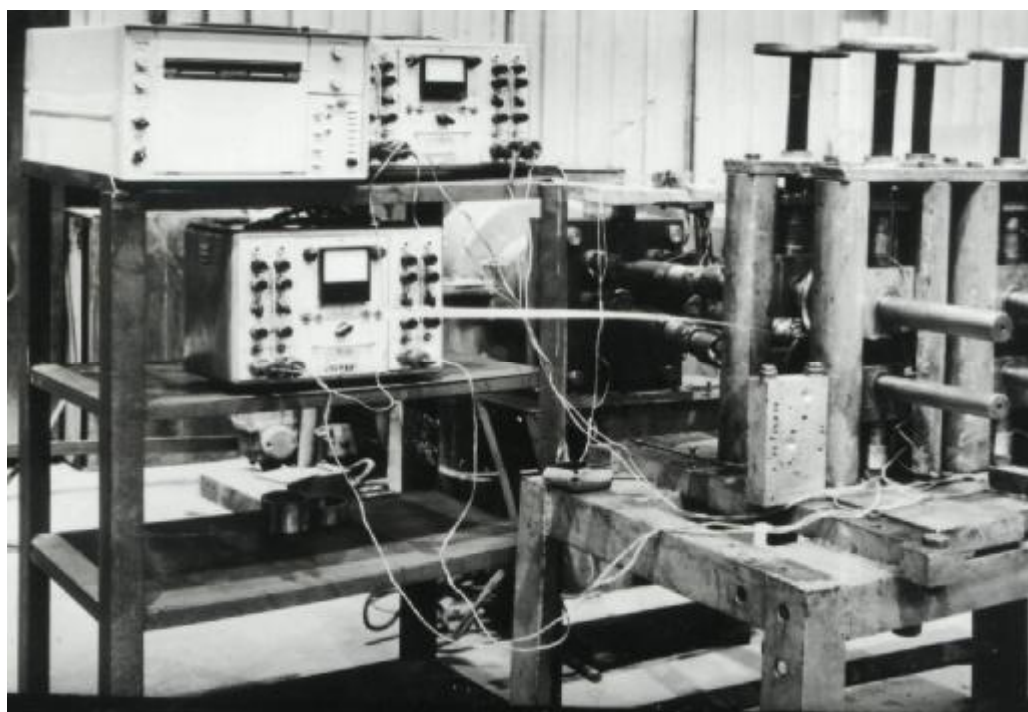


Рис. 4.4. Установка для исследования силовых параметров

Датчиками измерения усилия профилирования служили полые цилиндрические месдозы с наклеенными на них и собранными в полумостовые схемы проволочными тензорезисторами типа 2ПКБ–10–100 (рис. 4.5, а, б, в). Датчики размещались под нажимными винтами всех клеток станка. Передача усилий от нажимных винтов осуществлялась через шаровую пяту для устранения внецентрового нагружения. Крутящие моменты измеряли также при помощи тензорезисторов, наклеенных на каждый из шпинделей, передающих вращение от привода к верхнему и нижнему рабочим валам, под углом 45^0 к оси вала попарно

на диаметрально противоположных поверхностях.

Для включения тензорезисторов, расположенных на вращающихся валах, во внешнюю измерительную цепь применяли токосъемные устройства щеточного типа (с подпружиненными ламелями). Конструкция устройства и схема сборки тензорезисторов для измерения крутящего момента приведена на рис. 4.5, г.

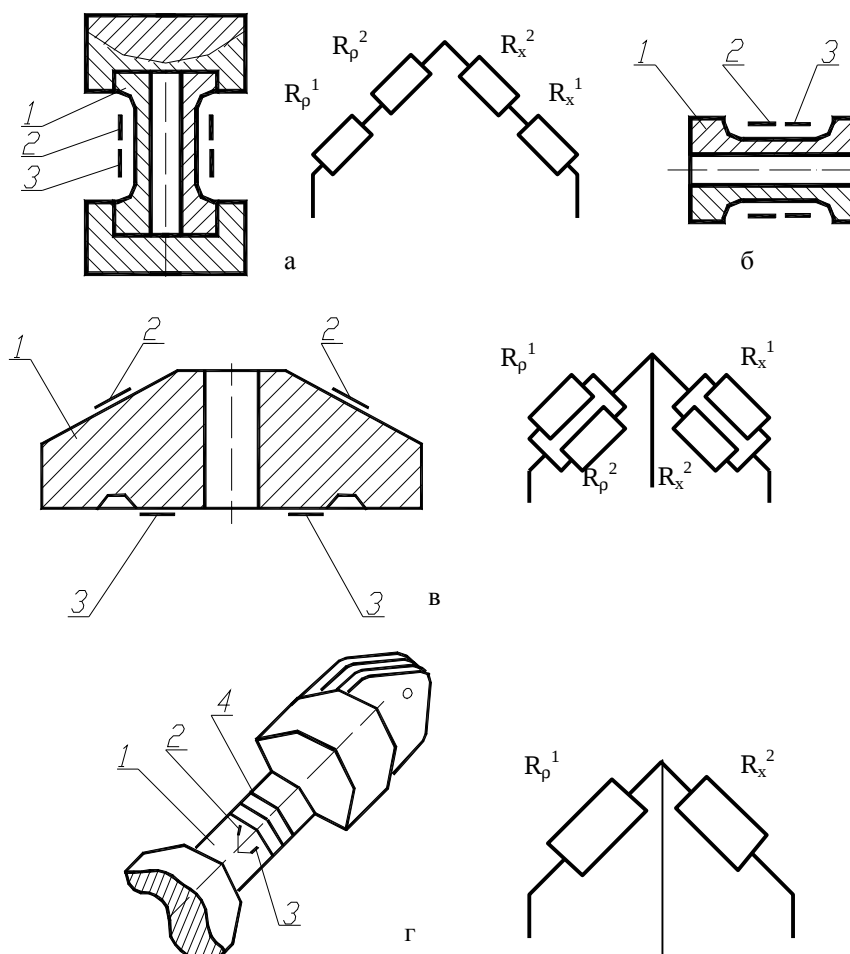


Рис. 4.5. Датчики и схемы сборки тензорезисторов:
1 – упругий элемент; 2, 3 – тензорезисторы (рабочий и компенсационный); 4 – токосъемные кольца

Для определения силовых факторов процесса правки применялось специальное устройство с фильерами, снабженное тензометрическими датчиками для восприятия вертикального и аксиального усилий правки: первый в виде консольной силовой балки равного сопротивления (вертикальное перемещение), второй – в виде тонкостенных втулок, расположенных на направляющих штангах и работающих на сжатие при создании аксиальной силы в фильерах. Тарировка всех силоизмерительных каналов проводилась прямым силовым нагружением датчиков на машине Р-10, или с помощью ручного лабораторного гидравлического пресса усилием до 40 кН с замером усилия посредством динамо-

метра ДОС–1. Тарировка датчиков крутящего момента производилась путем прямого нагружения через рычаг.

Программой экспериментов предусматривалось поэтапное исследование энергосиловых параметров.¹ На первом этапе рассматривалось влияние технологических факторов (зазор и ширина заготовки), определялись диапазоны значений, обеспечивающие нормальный процесс профилирования данной марки материала с точки зрения качества профилей и силовой загрузки оборудования. Измерение зазоров между роликами при настройке станка производили щупами с точностью 0,01 мм. Устанавливались исходные зазоры, равные и меньшие толщины материала. Ширину заготовок изменяли в пределах от $0,1S_0$ до $1,2 S_0$, толщину – от 0,8 до 2,0 мм. На втором этапе исследовали влияние свойств заготовки (толщина заготовки S_0 , предел текучести материала σ_T) при установленных оптимальных значениях технологических факторов. Исследования проводили на комплектах роликов под типоразмеры, представленные на рис.4.3.

На третьем этапе исследовали влияние поперечных и аксиальных сил, приложенных к очагу деформации со стороны правильного устройства на энергосиловые параметры профилирования.

Рабочие записи осциллограмм проводили с помощью измерительного комплекса, собранного на базе станка ЭГПС–350 (см. рис.4.4).

На первом этапе были определены энергосиловые параметры без влияния дополнительных сил аксиального или поперечного воздействия на очаг деформации. Как показали результаты, наибольшее влияние на силовые параметры оказывает радиальный зазор между роликами; с уменьшением зазора усилие P_N и момент M профилирования заметно увеличиваются (рис.4.82 а, б). Так, для корытообразного профиля с отбортовками уменьшение зазора с 0,8 до 0,6 толщины заготовки увеличило распирающее усилие более чем на 50%. Начиная с зазора, $S_k < 0,6S_0$ происходило обжатие и раскатка стенки профиля. Таким образом, с учетом жесткости клетки станка для нормальных условий профилирования необходимо устанавливать исходный зазор S_k в пределах от 0,6 до 0,8 от толщины исходной заготовки. Меньшее значение относится к сплавам с большим значением предела текучести (сплав В95), большее – для сплавов Д16, 1420.

Значительное влияние оказывает избыток ширины заготовки (рис.4.6 в, г). С увеличением ширины заготовки силовые параметры профилирования увеличиваются в значительной степени. При $\Delta B/(S_0 n) > 1,0$ начинается аксиальная вытяжка профиля, которая может достигать 7 – 10 % (для мягких сплавов типа Д16М). При этом увеличиваются поводки профилей, искажается поперечное сечение. Более интенсивное увеличение силовых параметров отмечается у более прочных материалов (типа В95).

При значениях $\Delta B/(S_0 n) < 0,1$ процесс гибки мало чем отличается от обычной гибки и получить малые радиусыгиба не всегда возможно, особенно

¹ Подготовка, сборка экспериментальной установки, снятие замеров выполнены с.н.с. Москвиным А.С.

для сплава В95 или 1420ТГ. Поэтому диапазон значений $\Delta B/(S_0 n)$ от 0,1 до 1,0 обеспечивает наиболее благоприятные условия профилирования, причем большие значения из этого диапазона характерны для высокопрочных материалов, меньшие – для мягких (типа Д16М).

Наиболее значительное влияние на энергосиловые параметры имеет толщина материала. Экспериментальные данные (рис.4.7 а, б) показывают интенсивный рост значений силовых параметров с увеличением толщины, что объясняется увеличением площади сечения и поперечной жесткости заготовки.

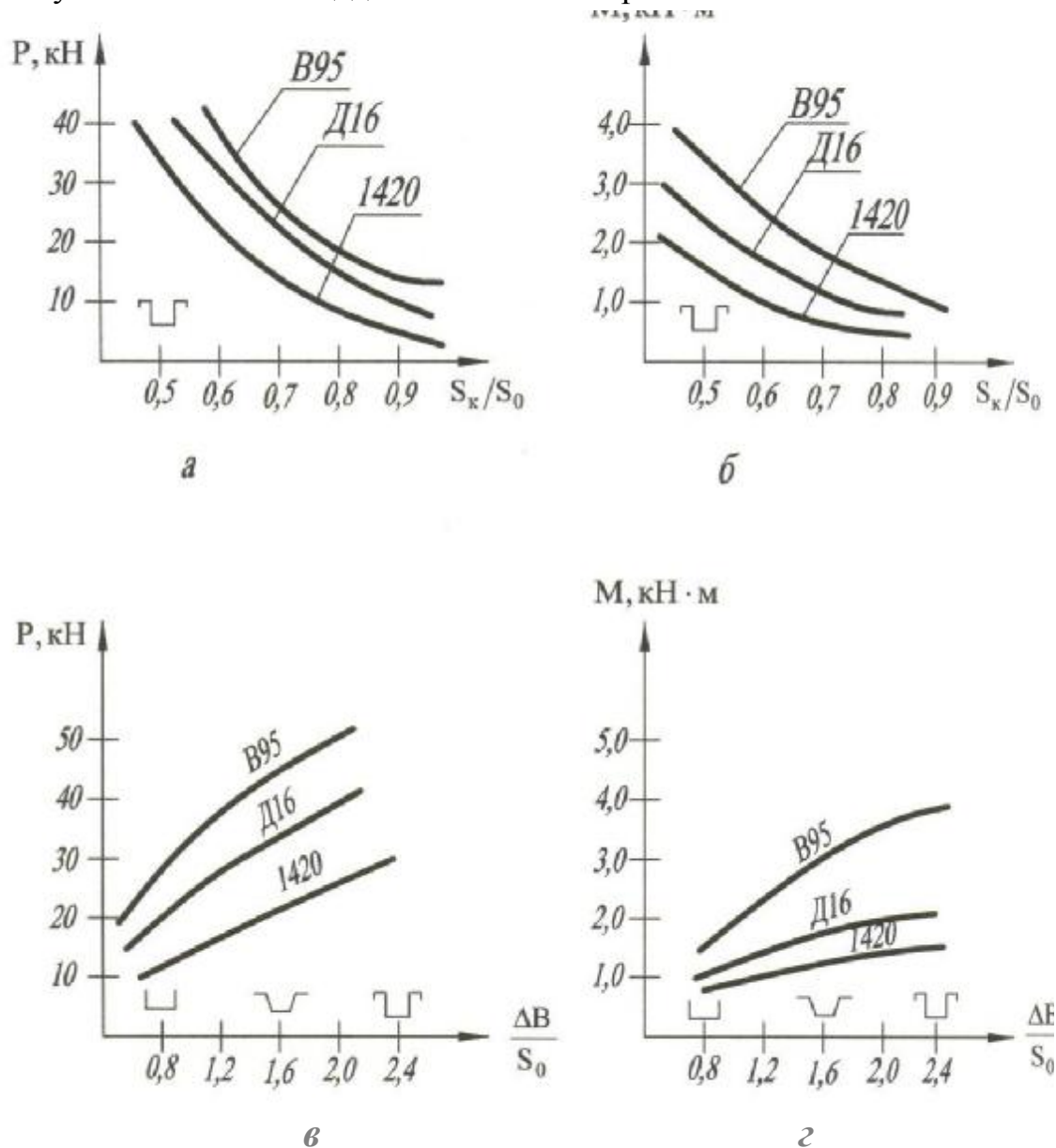


Рис. 4.6. Зависимость распирающего усилия и крутящего момента от технологических параметров

Между силовыми параметрами процесса и пределом текучести заготовки существует почти прямо пропорциональная зависимость (рис.4.7, в, г), что согласуется с формулами (4.21) и (4.22). Можно отметить удовлетворительную сходимость (в пределах 15 – 20 %) экспериментальных данных, приведенных на рис. 4.6 и 4.7, с формулами (4.21) и (4.22) [144].

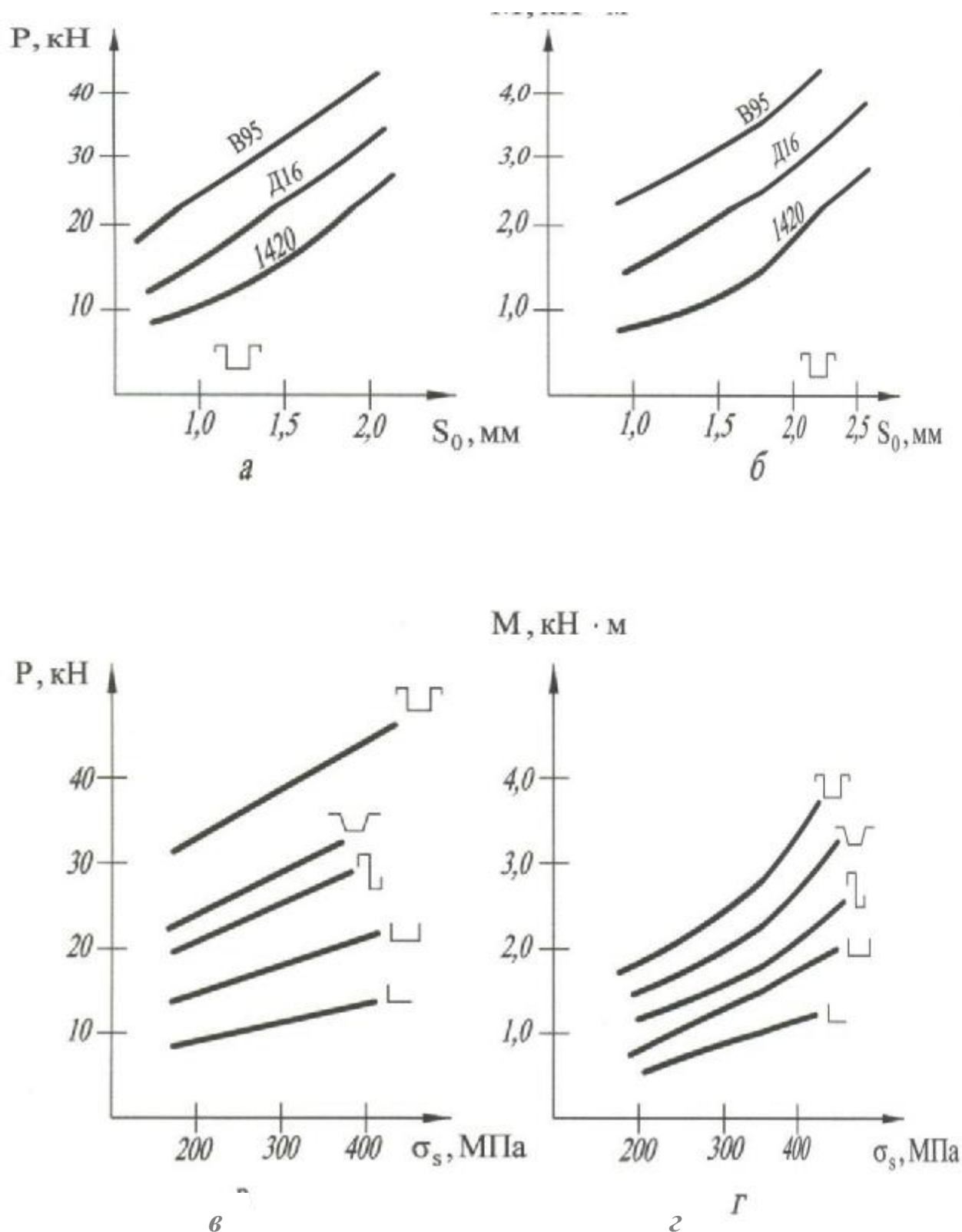


Рис. 4.7. Зависимость распирающего усилия и крутящего момента от параметров заготовки

Результаты исследований энергосиловых параметров включены в отраслевые РТМ [127] и были использованы при разработке очередных модификаций станков семейства ГПС.

4.6. Влияние углов захода профиля в калибр при СИ

Как было показано в разд. 3, кривизна профиля зависит от его геометрии и от принятых технологических решений. При изготовлении специальных видов профилей выбором параметров роликов и настройкой оборудования избавиться от продольной кривизны не удастся. В этой связи надлежит исследовать влияние внешних воздействий на профиль в процессе формообразования. Возможны два варианта осуществления этих воздействий: на входе в пару роликов окончательного формообразования и по выходу из нее профиля.

Были проведены экспериментальные исследования влияния вертикального и бокового углов захода и механических свойств материала заготовки на кривизну получаемого профиля [146]. Изготавливали швеллерные профили (рис. 4.3, а) из материалов 01420, Д16М и Д16Т. Для каждого уровня варьирования входных параметров изготавливали партию из пяти профилей. Экспериментальные результаты, отражающие характер влияния угла захода на продольный прогиб, представлены на рис. 4.85, где прямая получена обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Следует отметить, что технология, при которой центры тяжести сечений профиля на различных переходах располагаются на одной прямой, не может обеспечить прямолинейности профиля. На рис. 4.8 такой настройке стана соответствует продольный прогиб в нижнюю



Рис. 4.8. Зависимость прогиба от угла захода: о – 1420, – Д16Т, ∇ – Д16М

полуплоскость, равный 40 мм/м. При угле захода $\psi = 3^\circ$ продольный прогиб устраняется полностью. Интересно отметить слабую зависимость прогиба профиля от механических свойств заготовки, хотя и прослеживается тенденция к уменьшению прогиба с увеличением предела текучести материала.

Боковой угол захода (в горизонтальной плоскости) изменяли от 6° в обе стороны. При этом оказалось, что его влияние на продольный прогиб отсутствует, а на боковой прогиб (саблевидность) влияние его незначительно. Однако скрутка возросла от нуля до 30 град/м, что объясняется различием условий формообразования вертикальных стенок вследствие бокового смещения профиля.

Отметим воздействие угла захода ψ на горизонтальные характеристики сечения получаемого профиля. На рис. 4.9 даны точки замеров толщины различных элементов профиля из сплава Д16М. Как видно из табл. 4.5, с увеличением угла захода процесс формообразования интенсифицируется, что

выражается в утолщении зоны сгиба. При этом утонение стенки уменьшается, а торцевые участки несколько утолщаются.

Создание условий для интенсификации процесса за счет изменения угла захода в многоопорных станках возможно тремя путями. Во-первых, за счет смещения калибра в роликах; во-вторых, за счет смещения валов клетки окончательного формообразования; в-третьих, за счет введения дополнительного регулируемого по высоте нажимного ролика между клетями окончательного и предварительного формообразования.

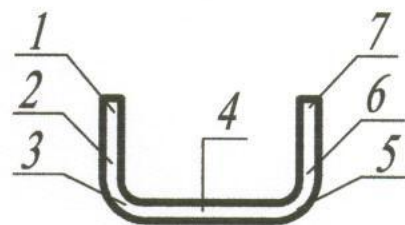


Рис. 4.9. Точки замеров толщины стенок профиля

Таблица 4.5

Характеристики сечений профилей из сплава Д16М

Угол захода, град.	Относительное утолщение, % в точках						
	1	2	3	4	5	6	7
-5	4,4	0,5	7,9	-2,5	6,6	0,4	4,4
2	4,1	0,4	7	-1,6	6,5	0,3	2,7
4	6,5	0	9,2	-1,8	12,9	0	5,5
6	7,2	0,2	12,7	-1,8	13,6	0,2	9,1
8	10,1	0,1	12,8	-0,9	14,8	0,2	11,1
15	9,9	0,1	12,6	-0,8	14,4	0	9,9

Проанализируем данные возможности с точки зрения их использования применительно к станкам семейства ГПС, предназначенных для изготовления профилей стесненным изгибом. Первая возможность должна быть отвергнута, поскольку смещение калибра в вертикальной плоскости относительно оси профилирования связано с большим перепадом скоростей нижнего и верхнего роликов, что отрицательно влияет на точность геометрических параметров и качество поверхности профиля.

Вторая возможность может быть реализована на станках типа ГПС–200, однако это усложняет процесс настройки и в последующих моделях станков нижние валы выполнены нерегулируемыми по высоте. Применение данного приема оправдано лишь в случаях изготовления специальных профилей, у которых дополнительную кривизну не удастся уменьшить с помощью других мероприятий.

Что касается использования нажимного ролика, то на рис. 4.10 даны зависимости прогиба от усилия F нажимного ролика для того же швеллерного профиля, описанного выше.

Таким образом, последние две возможности изменения угла захода позволяют интенсифицировать процесс, что является особо важным при изготовлении специальных видов профилей. В модификациях станков модели ГПС–300 и выше предусмотрена возможность установки нажимного ролика или роликового калибра. Однако применение нажимного ролика ограничивается слу-

чаем изготовления профилей из рулона, поскольку возникают проблемы задания заготовки в калибр роликов окончательного формообразования. Отметим, что влияние углов захода профиля в калибр также значительно и при использовании метода интенсивного деформирования.

Данные результаты были использованы для разработки технологии производства профилей с продольной кривизной: стеклоподъемников автомобиля УАЗ стесненным изгибом [147] и бамперов автомобилей ВАЗ методом интенсивного деформирования [148].

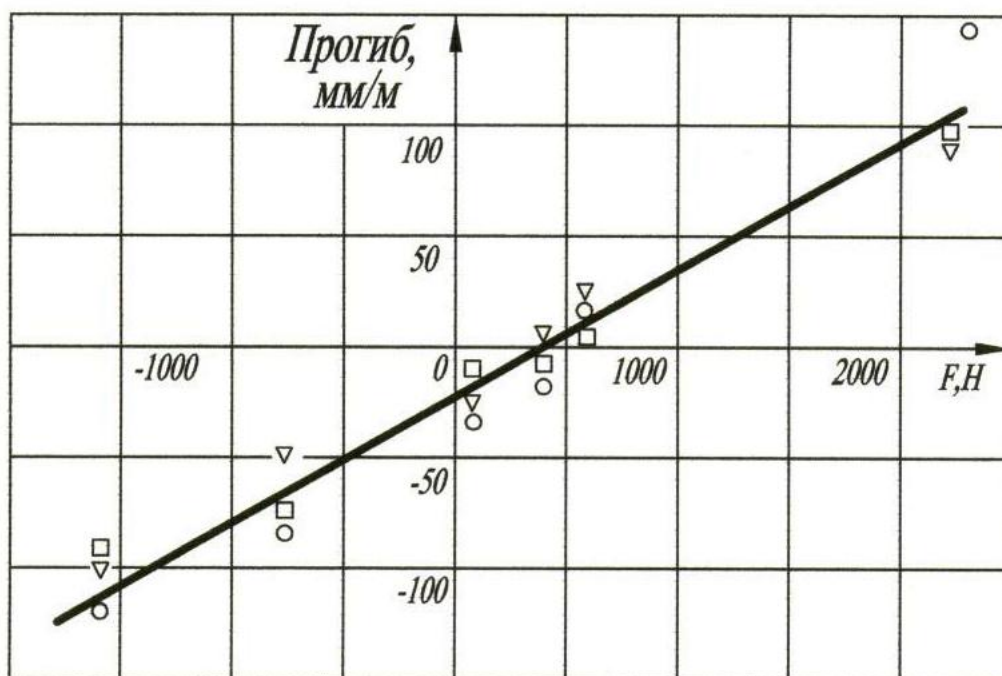


Рис. 4.10. Зависимость прогиба профиля от силы F: о – 1420; □ – Д16Т; ▽ – Д16М

Придание профилю продольной кривизны или саблевидности возможно также и путем локального обжима заготовки, что создает определенные проблемы в случае заготовок с органическим покрытием.

4.7. Деформационные параметры и моменты, влияющие на продольную кривизну профиля

Рассмотрим более подробно предпосылки и условия, влияющие на продольную кривизну профиля и частично рассмотренные в разд. 3.4. Пусть переход от предварительной формы (рис.11а) к окончательной (рис.11б) осуществляется по средней линии без учета скруглений на окончательном профиле. При проектировании предварительного перехода формообразования профилей стесненным изгибом обычно принимают радиус сопряжения стенки и боковой полки ρ_1 исходя из окончательной формы профиля:

$$\rho_1 = e_1/2 \sin \alpha, \quad (4.23)$$

где ϵ_1 – ширина стенки;
 α – угол подгибки боковой полки по отношению к стенке.

Величина прямолинейного участка l_n на предварительном переходе определяется по формуле:

$$l_n = \left[\frac{a}{\sin \alpha} \left(\frac{\epsilon_1}{2} + \epsilon_3 \right) + a \operatorname{ctg} \alpha \times \epsilon_2 - l_3 / 2 \right] / (\operatorname{ctg} \alpha - 1), \quad (4.24)$$

где ϵ_3 – ширина горизонтальной полки; ϵ_2 – ширина боковой полки; l_3 – ширина заготовки профиля.

Значение радиуса кривизны ρ_2 дуги окружности, подвергающейся последующей осадке для формообразования горизонтальной полки с учетом формулы (4.24), определяется следующим образом:

$$r_2 = \frac{\epsilon_3 + (\epsilon_2 - l_n) \cos \alpha}{\sin \alpha}. \quad (4.25)$$

Формулы (4.24) и (4.25) справедливы лишь для определенных сочетаний геометрических характеристик элементов профиля, а именно, если выполняется условие:

$$l/2 - \epsilon_1 \left(a - \frac{\sin \alpha}{2} \right) - \epsilon_2 \cos \alpha - \epsilon_3 < 0. \quad (4.26)$$

Если же условие (4.26) не выполняется, то в этом случае берут $\rho_1 = \rho_2$, а формула (4.24) заменяется более простой:

$$l_n = \frac{l_3 / 2 - b_1 \cdot \left(a - \frac{\sin \alpha}{2} \right) - b_2 \cdot \cos \alpha - b_3}{1 - \cos \alpha}. \quad (4.27)$$

Рассмотрим теперь процесс осадки заготовка с целью формообразования стенки (рис. 4.12). При осадке происходит перемещение части заготовки таким образом, что формируется цилиндрическая поверхность, образующие которой параллельны оси ОХ и располагаются на расстоянии h от плоскости, касательной к заготовке и одновременно параллельной плоскости ХУ. Тогда расстояние h определяется формулой:

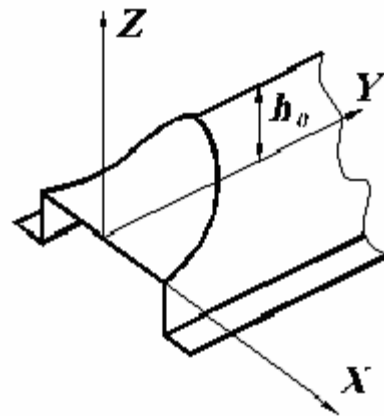


Рис. 4.12. Схема осадки стенки заготовки

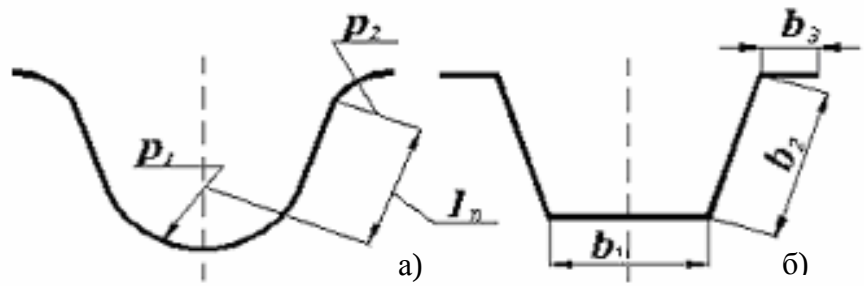


Рис. 4.11. Формы переходов при стесненном изгибе:
а – предварительная; б – окончательная

$$h = \rho_1(1 - \cos \alpha - 2 \alpha \sin \alpha) - v \sin \alpha, \quad (4.28)$$

где v – текущее значение образующей цилиндрической поверхности, изменяющееся от 0 до v_1 .

Приступим теперь к определению деформаций, возникающих на цилиндрической поверхности и имеющие направления, совпадающие с касательной линией к цилиндрической поверхности в каждой точке. Для этого сделаем переход от декартовой системы координат к цилиндрической:

$$x = X; y = R \cdot \cos \gamma; z - R = R \cdot \sin \gamma, \quad (4.29)$$

где R, γ, X – цилиндрические координаты.

Вычисление накопленной деформации ϵ_y для произвольного $x = \text{const}$ будем производить с учетом (4.29) по формуле:

$$e_y = \int_g^0 z(g) dg, \quad (4.30)$$

где $\xi(\gamma)$ – деформация бесконечно малого элемента в процессе перехода фиксированной точки поверхности ролика от угла γ к углу $(\gamma + d\gamma)$.

Деформация $\xi(\gamma)$ определяется следующим образом::

$$\xi(\gamma) = \ln ds/ds_1, \quad (4.31)$$

где ds – длина элемента при $R = \text{const}, x = \text{const}$ после деформации; ds_1 – длина элемента дуги при $R = \text{const}, x = \text{const}$ до деформации.

Как известно [149], длина элемента в криволинейной системе координат дается формулой:

$$dS_i = H_i dq_i, \quad (4.32)$$

где H_i – коэффициент Ляме; q_i – криволинейная координата.

По определению:

$$H_i = \left[\left(\frac{dx}{dq_i} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dq_i} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dq_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.33)$$

Тогда длина элемента после деформации определяется путем весьма несложных вычислений из формул (4.29), (4.32), (4.33).

Начальная длина элемента находится из рассмотрения (инфинитезимального) приращения координаты $d\gamma_i$:

$$ds_i = R_i \cdot \cos \gamma_i \cdot d\gamma_i. \quad (4.34)$$

С учетом того, что для нашего случая значение криволинейной координаты R_i совпадает с величиной радиуса формирующего ролика, получим с учетом опускания индекса из соотношений (4.31), (4.34) и предыдущих рассуждений, значение:

$$\xi(\gamma) = \ln \sec \gamma. \quad (4.35)$$

Подставляя значение $\xi(\gamma)$ формулы (4.35) в формулу (4.30) и, производя интегрирование, получим:

$$e_g = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n-1}(2^{2n}-1)}{n(2n+1)!} \cdot B_n \cdot g^{2n+1}. \quad (4.36)$$

где B_n – числа Бернулли.

Из геометрического рассмотрения осадки стенки (рис. 4.12) следует:

$$g = \arccos \left(1 - \frac{h}{R_1} \right). \quad (4.37)$$

Используя формулу (4.28) и полагая $v = 2 \cdot x$, имеем из соотношения (4.37):

$$g = \arccos \left[1 - \frac{r_1}{R_1} (1 - \cos a - 2 \cdot a \cdot \sin a) + \frac{2 \sin a}{R} \cdot x \right], \quad (4.38)$$

где r_1 определяется формулой (4.23).

Из выражений (4.36) и (4.38) получаем распределение деформации по стенке при выходе из калибрующей пары роликов:

$$e_g = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n-1} (2^{2n} - 1) B_n}{n (2n+1)} \left\{ \arccos \left[1 - \frac{r_1}{R_1} \left(1 - \cos a - 2 \cdot a \cdot \sin a + \frac{2 \sin a}{R_1} \cdot x \right) \right] \right\}. \quad (4.39)$$

Как следует из формулы (4.39) величина деформаций зависит как от окончательной и предварительной форм профиля, так и от размеров формирующего инструмента. Надлежит также отметить инвариантность формулы (4.39) по отношению к параметрам, характеризующим механические свойства материала заготовки.

Для обычной деформации формула (4.39) имела бы более простой вид:

$$e_g = \sqrt{2 \frac{h}{R_1} - \left(\frac{h}{R_1} \right)^2} - \arcsin \left[\sqrt{2 \frac{h}{R_1} - \left(\frac{h}{R_1} \right)^2} \right], \quad (4.40)$$

где h – определяется формулой (4.28) при $v = 2 \cdot x$.

Формула (4.40) несколько менее громоздка по сравнению с формулой (4.39), однако, более отражающими процесс деформирования являются логарифмические деформации, хотя при малых степенях деформаций обычные и логарифмические деформации практически совпадают.

Наличие аксиальных деформаций, определяемых формулами (4.39) или (4.40), свидетельствуют о возможности образования продольного прогиба профиля при выходе его из пары роликов окончательного формообразования, если аксиальные деформации горизонтальных полок не создают условий для получения прямолинейного профиля.

Действительно, если существует некоторая разность (суммарная) аксиальных деформаций стенки e_γ и деформаций полок e_r (средняя часть профиля не деформируется), то возникают эффективные продольные силы, создающие вращающий момент, ответственный за создание кривизны профиля $1/R_0$. Ввиду симметрии, неравномерность распределения деформации не приводит к скручиванию профиля, однако создает остаточные напряжения, которые редуцируются последующей термообработкой.

Определим теперь деформации, возникающие при формообразовании горизонтальных полок. Поверхность, образующуюся под воздействием роликов, можно описать уравнением линейчатой поверхности:

$$x = e_1 / 2 = r_i \cdot \sin\left(a \frac{y}{l_0}\right); \quad y = y; \quad z + H + S_0 = r_i \cos\left(a \frac{y}{l_0}\right), \quad (4.41)$$

где r_i – расстояние от осигиба до произвольной точки поверхности;
 l_0 – длина деформированной зоны.

Используя соотношения (19) и определение натуральной деформации, можно найти распределение аксиальных деформаций горизонтальной полки:

$$e_r = \ln H_r, \quad (4.42)$$

где H_r – коэффициент Ляме.

Применяя определение (4.33), находим с использованием уравнения геликоидальной поверхности (4.41) величину коэффициента Ляме:

$$H_r = \left[1 + a^2 \left(\frac{r}{l_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.43)$$

Из выражений (4.42) и (4.43) после небольших преобразований получаем:

$$e_r = \frac{1}{2} \ln \left[1 + a^2 \left(\frac{r}{l_0} \right)^2 \right]. \quad (4.44)$$

В формуле (4.44) l_0 можно определить из чистого геометрического процесса деформирования полки:

$$l_0 = \left[2 \cdot R_2 \cdot r_2 \cdot (1 - \cos a) - r_2^2 \cdot (1 - \cos a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.45)$$

где R_2 – радиус ролика, формирующего горизонтальную полку.

Сделаем теперь переход от деформации к действующим силам, создающим момент. Известно (7), что интенсивность деформаций $(e_i)_\gamma$ для ортотропного тела определяется формулой:

$$e_{ig} = \sqrt{\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx}m_{xy}}} \times \sqrt{\frac{e_y^2}{m_{yx}} - 2 \cdot \frac{e_y^2}{m_{yx}} + \frac{e_x^2}{m_{xy}}}, \quad (4.46)$$

где μ_{xy} , μ_{yx} – коэффициенты поперечной деформации, где первый индекс показывает направление поперечной деформации, а второй – направление действия силы.

С учетом условия несжимаемости материала (толщина стенки не изменяется), из формулы (4.46) для стенки получаем:

$$e_{ie}^c = \sqrt{\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx}m_{xy}}} \cdot \left(\frac{1}{m_{xy}} + \frac{1}{m_{yx}} - 2 \right) \cdot e_g. \quad (4.47)$$

Для горизонтальных полок аналогично:

$$e_{iy}^n = \sqrt{\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx}m_{xy}}} \cdot \left(\frac{1}{m_{xy}} + \frac{1}{m_{yx}} - 2 \right) \cdot e_r. \quad (4.48)$$

Применяя известное соотношение для степенного закона упрочнения, действующее напряжение σ_{iy} определяется как:

$$\sigma_{iy} = \sigma_{0i} \cdot \epsilon_{iy}^n, \quad (4.49)$$

где σ_{0i} , n - константы материала в направлении оси прокатки.

Для вычисления момента необходимо определить положение центра тяжести профиля Z_c . Воспользовавшись известными формулами из теории двойного интеграла, получим:

$$Z_c = \frac{S_0 \left(\frac{H^2}{2 \sin a} + \frac{2H^2}{\operatorname{tg} a} + b_3 H + S_0 H - \frac{S_0^2}{2} \right) + S_0^2 \left(\frac{b_1^2}{2} - \frac{3H}{2 \operatorname{tg} a} - \frac{b_3}{2} - \frac{H}{\sin a} - H \right) + S_0^3 \left(\frac{2}{3 \operatorname{tg} a} + \frac{1}{2} \right)}{S_0 \left(S_0 + b_1 + b_3 + \frac{1}{\sin a} \right) + S_0^2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} a} - \frac{2}{\sin a} - 1 \right)}, \quad (4.50)$$

где S_0 – толщина исходной заготовки; $H = b_2 \cdot \sin a + S_0$.

Тогда момент M_0 действующих сил, создавших продольную кривизну, с учетом (4.47), (4.49), (4.50) определится как:

$$M_0 = 2S_0 K_0 \left[Z_c \int_0^{b_1/2} e_g^n dx - (H + Z_c) \int_0^{b_3} e_r^n dr \right], \quad (4.51)$$

где $K_0 = s_{on} \sqrt{\frac{m_{yx}}{1 - m_{yx} m_{xy}} \left(\frac{1}{m_{yx}} + \frac{1}{m_{xy}} - 2 \right)}$.

Вычисление интегралов в формуле (4.51) можно реализовать лишь с помощью ЭВМ.

Таким образом, в результате рассмотрения процесса формообразования нами выяснены факторы, определяющие кривизну получаемого профиля. Заметим, что величину кривизны $1/R_0$ профиля можно определить следующим образом:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{b_1 \int_0^{b_3} e_r dr - b_3 \int_0^{b_1/2} e_g dr}{2 \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_3 \cdot M}. \quad (4.52)$$

Из формулы (4.52) видно, что кривизна получаемого профиля зависит как от геометрических характеристик его поперечного сечения, так и от технологических решений.

4.8. Правильное устройство для устранения продольной кривизны

Как мы установили, при изготовлении профилей в паре роликов окончательного формообразования возникает момент M_0 . Очевидно, что для исключения продольной кривизны требуется выполнение условия:

$$M_0 = 0. \quad (4.53)$$

Однако на практике такие условия реализовать не удастся из-за конкурирующего характера входящих в уравнение (4.51) параметров. Данный вопрос

уже обсуждался в разд. 3.4, где было показано, что для обеспечения прямолинейности профиля необходимо приложение внешнего момента к заготовке, выходящей из калибра последней пары формирующих роликов (см. условие (3.26)).

Внешнее воздействие на очаг деформации может осуществляться правильным устройством, работающим по принципу обратной механической связи (рис. 4.13). Часть профиля, проходящая в данный момент через роликовый калибр, подвержена действию со стороны роликов суммарного момента M_0 . Вышедшая из очага деформации часть профиля подвержена действию со стороны правильного устройства моментом M_n . Условие точного уравнивания этих моментов (в квазистатическом, точнее, установившемся режиме) обеспечивает прямолинейность профиля. Однако такие условия выполняются далеко не всегда, поскольку имеет место ряд случайных факторов: отклонение ширины заготовки от номинального значения вследствие несовершенства операций раскроя, неровность кромок, загрязнение поверхности заготовки, температурные изменения в цехе, другие факторы, носящие стохастический характер. При наличии рассогласования моментов правильное устройство отрабатывает его путем перемещения в пространстве и передачи управляющего воздействия через жесткую механическую связь (сам профиль) в очаг деформации.

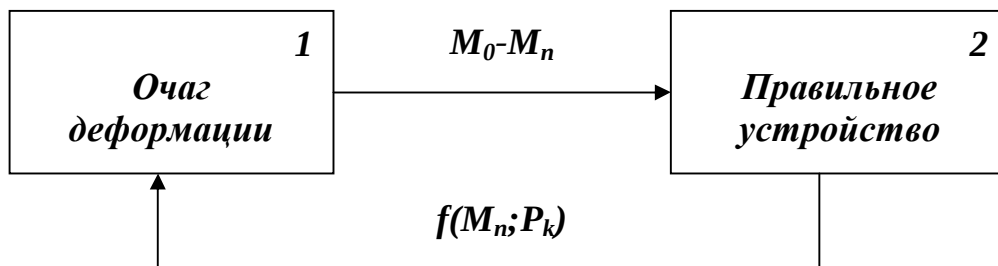


Рис. 4.13. Схема работы специального правильного устройства

Правильное устройство, реализующее условие (3.26), должно обладать следующими свойствами:

1. Иметь возможность спрямляющего воздействия на профиль, поскольку в первоначальный момент с начальной кривизной $1/R_0$, выходит он из пары роликов окончательного формообразования.
2. Обеспечивать возможность изменения угла выхода профиля, поскольку именно изменения угла выхода может обеспечить выполнение условия (3.26).
3. Обеспечивать аксиальное поджатие в очаге деформации с целью лучшего заполнения уголка и выравнивание аксиальных действующих напряжений, с целью уменьшения остаточных напряжений.
4. Иметь возможность предотвращать скручивания профиля в случае формообразования профилей, не обладающих симметрией.
5. Иметь возможность самонастройки посредством обратной связи через движущийся профиль.
6. Иметь возможность горизонтальной настройки с целью избежания саблевидности профиля.

В качестве правильного устройства, действующего на основе вышеуказанного принципа, можно предложить устройство, включающее правильный

блок, несущий коромысла с закрепленными на его концах фильерами, обеспечивающими спрямляющее воздействие на профиль.

Ось вращения коромысла должна быть подпружинена в вертикальной плоскости с целью обеспечения возможности задания угла выхода профиля, так же как и в горизонтальной плоскости для обеспечения аксиального поджатия и гарантированного приема профиля. Правильный блок должен расположен на направляющих штангах, закрепленных шарнирно в вертикальной плоскости на обойме, имеющей возможность поворота в плоскости, перпендикулярной оси профилирования, что позволяет устранять скручивание профиля. Поворачивающуюся обойму следует расположить в раме с возможностью регулировки последней в плоскости, перпендикулярной оси профилирования в вертикальном (для подстройки по высоте калибра в паре роликов окончательного формообразования) и горизонтальном (для устранения саблевидности) направлениях.

Описанное выше устройство по принципу действия может быть отнесено к одному из видов регулирующих устройств.

Количественная характеристика обратной связи дается функцией $f(M_n; P_a)$, которая включает в себя как момент M_n , так и аксиальное усилие P_a , создаваемое правильным устройством. Переход к анализу работы правильного устройства возможен после определения конструктивных параметров устройства на основе силового динамического режима, после чего появится возможность составления его передаточной функции.

Обеспечение благоприятных условий деформирования возможно за счет приложения к заготовке выходящей из роликов клетки окончательного формообразования сил, позволяющих вести процесс профилирования в условиях равенства суммы моментов внутренних сил нулю (условие (4.53)).

Реализовать данное условие можно с помощью специального правильного устройства, устанавливаемого за клетью окончательного формообразования (рис. 4.14).

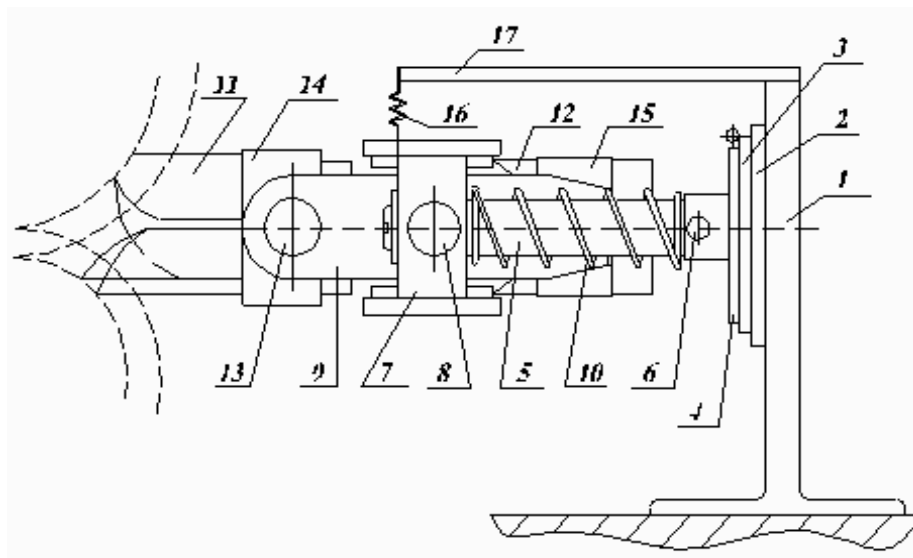


Рис. 4.14. Схема правильного устройства, реализующего правку гнутого профиля по принципу жесткой обратной связи

Устройство содержит станину 1, на которой установлена плита 2 с возможностью регулировки в вертикальной плоскости.

Плита 2 несет на себе плиту 3, имеющую регулировку в горизонтальной плоскости. На плите 3 установлена обойма 4, имеющая возможность поворота в плоскости перпендикулярной оси правки.

На обойме 4 симметрично установлены две штанги 5, имеющие возможность поворота в вертикальной плоскости относительно шарниров 6. На штангах 5 установлены ползушки 7, несущие па себе шарниры 8 коромысел 9. Штанги 5 дополнительно несут на себе пружины 10, обеспечивающие работу устройства в динамическом и квазистатическом режимах. Коромысла 9 несут симметрично расположенные относительно шарниров 8, правильные калибры 11 и 12, имеющие возможность ограниченного поворота в вертикальной плоскости относительно шарниров 13, установленных на корпусах 14 и 15 калибров 11 и 12,

В качестве правильных калибров используются инструментальные фильеры. Для уравнивания правильного блока в вертикальной плоскости и обеспечения возвращающей силы имеются пружины 16, установленные между кронштейнами 17 и штангами 5.

Специальное правильное устройство описанной конструкции позволяет воздействовать на очаг деформации путем приложения аксиальной и перерезывающей сил, которые выравнивают распределение напряжений таким образом, что суммарный момент сил обращается в нуль.

4.9. Динамический режим работы правильного устройства

Целью этого этапа исследований является определение конструктивных параметров правильного устройства путем анализа режима его работы в момент захода профиля в правильное устройство (динамический режим), поскольку, именно в этом случае силовые характеристики процесса достигают своих максимальных значений

В качестве конструктивных элементов согласно рис. 4.14 берутся определяющие параметры устройства: длина коромысла 9, длина фильер 11, характеристики удерживающих пружин 10 и 16, а также параметры трансверсальных сечений коромысла 9 и стойки 1.

Рассмотрим процесс стабилизации правки от момента входа конца профиля в первую фильеру до момента достижения стабильного режима. Заметим, что профиль, выходящий из пары роликов окончательного формообразования, обладает некоторой кривизной $\rho = 1/R_0$ из-за неравномерности распределения деформаций по сечению профиля. При заходе в правильный калибр, размер ручки которого по сечению совпадают с размерами сечения профиля, происходит спрямление изогнутого участка профиля. При этом спрямляющая сила со стороны фильеры равно P_a . В начальный момент фильера поворачивается по отношению к профилю таким образом, чтобы спрямлять его по хорде. Следовательно, фильера имеет в момент прохождения через нее профиля (вторая фильера пока еще не пришла в контакт с профилем) некоторый угол наклона α по

отношению к оси профилирования. Тогда, если обозначить аксиальную силу, действующую на очаг деформации в паре роликов окончательного формообразования, Q , воздействие вдоль оси фильеры P_a определяется как:

$$P_a = Q / \cos \alpha. \quad (4.54)$$

Спрямление профиля эквивалентно обратному процессу прогиба профиля, вызванному одновременным действием поперечной и продольной силами. В этом случае дифференциальное уравнение для профиля можно записать в виде:

$$E \cdot J \cdot y = -\frac{P \cdot x}{2} - P_a \cdot y, \quad (4.55)$$

где E – модуль Юнга; J – момент инерции поперечного сечения профиля; x, y – декартовы координаты.

Вводя обозначение $x^2 = \frac{Pa}{EJ}$, преобразуем уравнение (4.55) к виду:

$$\ddot{y} + x^2 y = -\frac{2P}{4EJ} x, \quad (4.56)$$

Неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка (43) решается методом вариации постоянных, поскольку решение однородного уравнения хорошо известно. После проведения интегрирования получаем:

$$y = C_1 \cos x_a x + C_2 \sin x_a x - \frac{Px}{2Pa}, \quad (4.57)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования

Граничные условия для решения (4.57) следуют из того факта, что концы спрямляемой дуги не перемещаются вдоль оси ординат, а в средней части сечение профиля не поворачивается. Тогда максимальный прогиб профиля определяется выражением:

$$y_{mas} = \frac{x^2}{x_0^2} \left(\frac{1}{2x} \operatorname{tg} \frac{x}{2} - \frac{l}{4} \right), \quad (4.58)$$

где $x^2 = \frac{P}{EJ}$.

Полученная формула является асимптотически корректной, поскольку при отсутствии аксиального воздействия ($P_a = 0$) величина изгибающего момента $M_{изг}$, полученная с использованием решения (4.58), в асимптотике дает величину изгибающего момента при изгибе поперечной сосредоточенной силой:

$$M_{изг} = \frac{Pl}{4} \lim_{x \rightarrow l/2} \frac{\operatorname{tg} x}{x} = \frac{Pl}{4}.$$

Выразим теперь величину аксиального усилия через величину максимального прогиба. С использованием (45) получим трансцендентное уравнение для определения аксиального усилия:

$$2y_{mas} f = \frac{\operatorname{tg}(x \cdot a / 2)}{2 \cdot x \cdot a} - l / 4, \quad (4.59)$$

где f – коэффициент трения между фильерой и профилем.

При выводе формулы (4.59) мы исходили из того, что используемая нами фильера является жестко соединенной. В случае использования подпружиненных фильер, аксиальная сила находится из известного соотношения Амонтона-Кулона непосредственно, поскольку сила подпружинивания известна.

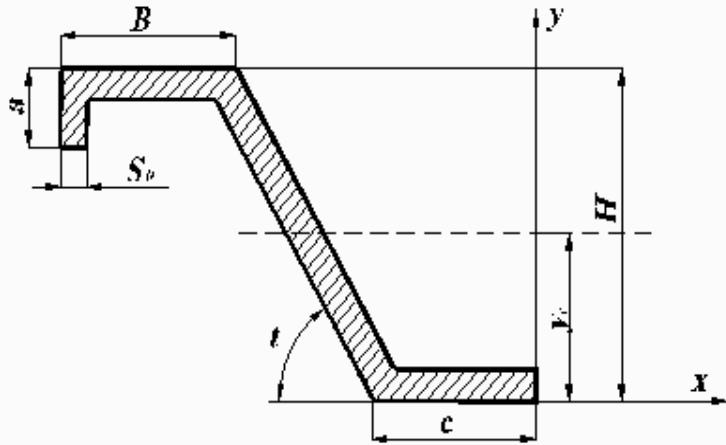


Рис. 4.15. Схема поперечного сечения профиля

Отметим, что полученные из уравнения (4.59) значения P_a должны использоваться посредством соотношения (4.54) при анализе напряженно-деформированного состояния в очаге деформации в паре роликов окончательного формообразования.

Для решения трансцендентного уравнения (4.59) относительно ξ_a необходимо знать Y_{mas} и J . Если известна кривизна профиля, выходящего из пары роликов окончательного перехода, то из геометрического рассмотрения процесса правки следует, что:

$$Y_{mas} \approx \frac{1}{8} \frac{l^2}{R}, \quad (4.60)$$

где l — длина фильеры.

Что касается определения момента инерции, то поступим следующим образом. Рассмотрим половину поперечного сечения симметричного профиля с лапками (рис. 4.16)

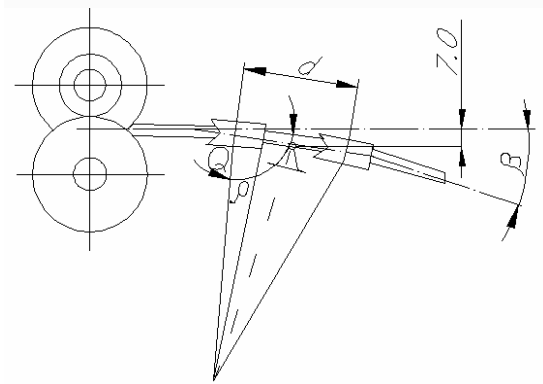


Рис. 4.16. Схема прохождения профиля через фильеры

и определим сначала центр тяжести данного профиля, а затем определим и момент инерции относительно линии, проходящей через центр тяжести параллельно оси X . Для определения центра тяжести Y_c воспользуемся формулой из теории двойного интеграла (4.53):

$$Y_c = \frac{\iint Y dF}{\iint_{(F)} dF}, \quad (4.61)$$

где F — площадь поперечного сечения профиля.

Заметим, что вычислять другую координату центра тяжести нет необходимости ввиду симметричности профиля. При вычислении интегралов в формуле (4.61) площадь сечения разбивается на ряд четырехугольников, стороны которых описываются прямыми, поэтому расстановка пределов интегрирования в интегралах не представляет большой сложности. В окончательном виде ординату центра тяжести запишем так:

$$Y_c = \frac{S_0 \left(\frac{H^2}{2 \sin g} + \frac{2H^2}{\operatorname{tg} g} + bH + aH + \frac{a^2}{2} \right) + S_0^2 \left(\frac{c}{2} - \frac{3H}{2 \operatorname{tg} g} - \frac{b}{2} - \frac{H}{\sin g} - H \right) + S_0^3 \left(\frac{2}{3 \operatorname{tg} g} + \frac{1}{2} \right)}{S_0 \left(a + b + c + \frac{H}{\sin g} \right) + S_0^2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} g} - \frac{2}{\sin g} - 1 \right)}, \quad (4.62)$$

где S_0 – толщина исходного листа; H – высота профиля; γ – угол, определяющий взаимное положение стенки и боковой полки; b – ширина полки, a – высота лапки; c – половина ширины стенки.

Корректность формулы (4.62) может быть подтверждена частным примером. Так, для симметричного корытообразного профиля, имеющего прямой угол и ширину задней стенки, равную удвоенной ширине полки, координата центра тяжести равна, очевидно, половине высоты профиля. Действительно, при $\gamma = \pi/2$, $a = S_0$, и $b = c$ из формулы (4.62) получаем: $y_c = H/2$.

Для определения момента инерции будем придерживаться следующей процедуры. Найдем сначала момент инерции относительно оси x , а затем уже – относительно оси, проходящей через центр тяжести параллельно оси x . Согласно работе [150], запишем выражение для J_x в виде:

$$J_x = \iint_{(F)} y^2 dF. \quad (4.63)$$

Поступая так же, как и при вычислении координаты центра тяжести, учитывая свойство аддитивности момента инерции, получим на основании формулы (4.63) выражение для вычисления момента инерции относительно оси x :

$$J_x = S_0^4 \left(\frac{1}{2 \operatorname{tg} g} - \frac{2}{3 \sin g} - \frac{1}{3} \right) + S_0^2 \left(\frac{c}{3} + \frac{b}{3} + \frac{H}{\sin g} - \frac{2H}{3 \operatorname{tg} g} + H \right) + S_0^2 \left(\frac{H^2}{2 \operatorname{tg} g} - \frac{H^2}{\sin g} - bH - H^2 \right) + S_0 \left(\frac{H^3}{3 \sin g} + H^2 b + H^2 a + \frac{a^3}{3} - Ha \right) \quad (4.64)$$

Данная формула верна, в чем можно убедиться, проводя анализ размерности и решая частный пример. Как известно, момент инерции прямоугольника относительно его основания равен произведению одной третьей основания на куб высоты. Сводя наш профиль (рис. 4.15) к прямоугольнику ($\gamma = \pi/2$, $a = S_0$, $b = S_0$, $c = S_0$), получаем из формулы (4.64):

$$J_x = \frac{S_0 H^3}{3}.$$

Далее, момент инерции относительно линии, проходящей через центр тяжести параллельно оси x , легко определяется по формуле Штейнера [71]:

$$J = J_x - Y_C^2 \cdot F. \quad (4.65)$$

Таким образом, с помощью формул (4.65), (4.60), (4.59) получаем значение аксиальной силы, возникающей при правке.

Рассмотрим далее силы, возникающие в поперечном направлении при динамическом режиме работы, для чего получим необходимые геометрические соотношения из условия захода профиля во вторую фильеру (рис. 4.16):

$$\Gamma \lambda_0 = d \sin \beta, \quad (4.66)$$

$$l = 2 \rho \operatorname{ctg} \theta, \quad (4.67)$$

$$d = 2\sqrt{r^2 + (l/2)^2} \cos(q - b), \quad (4.68)$$

где λ_0 – отклонение центра коромысла от оси профилирования; d – расстояние между центрами фильер; β – угол между осью профилирования и прямой, соединяющей центр первой фильеры с центром кривизны профиля.

Исключая из системы уравнений (4.66), (4.67), (4.68) величины θ и β , получим величину отклонения:

$$l_0 = \frac{\frac{l}{r^2} + \sqrt{\frac{4l^2}{(dq)^2} + \frac{2}{d} - \frac{4}{q^5}}}{2 \left[\left(\frac{l}{dr} \right)^2 + \left(\frac{2}{d} \right)^2 \right]}. \quad (4.69)$$

Очевидно, отклонение точки Γ профиля, находящийся непосредственно перед входом во вторую фильеру, будет вычисляться следующим образом:

$$z = 2l_0 - \frac{2l_0 l}{d} \sqrt{1 - \frac{4l_0^2}{d^2}}. \quad (4.70)$$

Формулы (4.69) и (4.70) определяют отклонение профиля от оси профилирования в зависимости от кривизны профиля ρ и характеристик правильного устройства l и d . В случаях, когда выполняется условие $d > 4H$ и $D - l < H$ при радиусе кривизны профиля более $20H$ можно пользоваться более простым соотношением:

$$z = \frac{1}{4} \frac{H^2}{r}.$$

Приведение профиля к прямолинейному положению осуществляется за счет воздействия вертикальных пружин. Данный процесс можно смоделировать, если представить изогнутый профиль подверженным действию возвращающей силы P_b , приложенной к средней точке коромысла через посредство правильных фильер.

Используя пример консольной балки с шарнирным закреплением одного из концов, выразим возвращающую силу P_b , через геометрические параметры процесса, используя соотношение (4.70):

$$2l_0 - \frac{2l_0 \cdot l}{d} \sqrt{1 - \frac{4l_0^2}{d^2}} = \frac{P \cdot b - d^3}{3E \cdot J}, \quad (4.71)$$

где J определяется формулой (4.65).

Заметим однако, что существуют два ограничения на величину P_b возможности возврата профиля, к прямолинейному состоянию необходимо, чтобы выполнялось допущение о принятом типе закрепления профиля, то есть должно выполняться условие:

$$2l_0 Pa > P_b d \sqrt{1 - \frac{4l_0^2}{d^2}}. \quad (4.72)$$

Физически неравенство (4.72) означает исключение скольжения между профилем и фильерой в отсутствие аксиальной проталкивающей силы со стороны роликов.

Второе условие является еще более существенным с физической точки зрения, поскольку при правке недопустима потеря устойчивости профиля в очаге деформации.

Требование недопустимости потери устойчивости профиля под действием вертикальных пружин может быть сформулировано в терминах действующих моментов:

$$2 \int_{(F/2)} d_s \times y \times dF \left\{ \Delta + \frac{d}{2} \sqrt{1 - \frac{4 l_0^2}{d^2}} \right\} P_b, \quad (4.73)$$

где Δ – расстояние от вертикали, соединяющий центры, валов пары роликов окончательного формообразования до середины первой фильеры при сжатых до упора горизонтальных пружинах.

Неравенство (4.73) выражает условие, того, что момент возвращающего усилия не должен превосходить момент трения пластического шарнира во избежание потери устойчивости профиля в вертикальной плоскости. Условие (4.73) практически всегда выполняется, поскольку влияние вертикальных пружин не является определяющим.

Уравнение (4.71) дает возможность получить значение усилия, действующего на коромысло при динамическом режиме, а неравенство (4.72) лишь устанавливает ограничения на его область допустимых решений. Входящие в соотношения (4.71), (4.72), (4.73) величины d и l выбираются из следующих соображений практического характера. Длина коромысла берется равной $6H$, так как именно такая длина коромысла дает возможность захода профиля во вторую фильеру без дополнительных ловителей. И при этом получают удовлетворительные результаты правки. Длина фильер берется равной $(3 \div 4)H$ из расчета спрямляющего воздействия на профиль с учетом заходной части.

На основе полученных силовых характеристик динамического режима процесса правки (рис. 4.17) можно рассчитать параметры горизонтальных и вертикальных пружин согласно методике работы [151], а параметры поперечного сечения коромысла и вертикальной стойки станины можно выбрать в соответствии с работой [152]. Параметры правильного устройства должны выбираться на основе вышеприведенного рассмотрения в зависимости от габаритов профиля, толщины и механических свойств исходного материала.

В данном случае надлежит руководствоваться тем положением, что используемые при изготовлении тонкостенных профилей (толщина стенок до 3 мм) правильные устройства должны иметь различные характеристики, если моменты инерции профилей, подлежащих изготовлению, отличаются более чем на 2000 мм^4 . В табл. 4.6 приводятся данные расчетов правильных устройств, применяемых при изготовлении длинномерных профилей. Устройство № 1 используется при изготовлении профилей корытного типа с размерами $c = 15 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$, $a = S_0 = 1,5 \text{ мм}$, $H = 20 \text{ мм}$. Устройство № 2 используется при изготовлении профилей корытного типа с размерами: $C = 8 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$, $a = S_0 = 1 \text{ мм}$, $H = 15 \text{ мм}$, а швеллерного типа с размерами: $C = 12 \text{ мм}$, $b = a = S_0 = 1 \text{ мм}$, $H = 14 \text{ мм}$.

В описанных устройствах в качестве оснастки применяются фильеры, которые могут использоваться и для более широкой номенклатуры профилей благодаря их (фильер) конструкции, предусматривающей значительный зазор для боковых стенок. Отметим лишь, что устройство № 1 применяется для правки профилей с $J = 1500 - 3000 \text{ мм}^4$, а устройство № 2 – для профилей с $J = 3000 - 6000 \text{ мм}^4$.

При изготовлении профилей из листа небольших размеров более рациональным представляется применение жестко установленного зазора в фильерах ввиду того, что в данном случае величина оконечной части профиля, имеющего значительную кривизну, меньше, примерно, на 4 % по сравнению с результатами правки с использованием подпружиненных фильер, имеющих нежесткий зазор. При изготовлении длинномерных профилей из ленты возможно использование подпружиненных фильер с целью создания требуемого аксиального усилия Q для получения большего утолщения в зоне сгиба. Что касается качества правки, то в том и в другом случае прогиб профиля не превышает 1,5 мм на 1000 мм его длины.

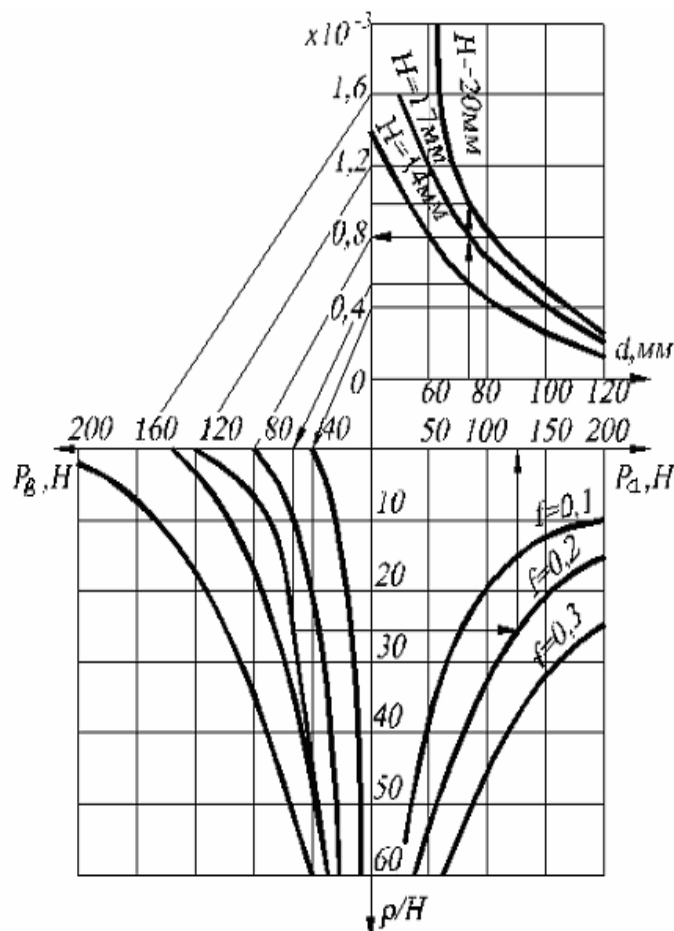


Рис. 4.17. Номограмма расчета силовых параметров правильного устройства

Таблица 4.6

Номер устройства	Длина коромысла, мм	Длина фильеры, мм	Площадь сечения коромысла, мм ²	Площадь сечения плиты, мм ²	Горизонтальная пружина				Вертикальная пружина			
					Диаметр проволоки, мм	Диаметр витков, мм	Число витков	Рабочая нагрузка, Н	Диаметр проволоки, мм	Диаметр витков, мм	Число витков	Рабочая нагрузка, Н
1	114	96	440	2050	2	26	21	210	2	30	21	150
2	80	70	330	1440	2	30	26	140	2	20	25	90

Для вычисления величин аксиального усилия P_a , возвращающего усилия P_b , и кривизны $1/R_0$ была составлена, отлажена и использована программа *СИЛА* на языке "Basic-Pro", состоящая из следующих структурных модулей:

1. Ввод исходных данных (команды № 10 – 460).
2. Контроль и засылка исходных данных в файл данных (File) (команды № 470 – 620).
3. Подготовка оперативной памяти для записи результатов вычислений (команды № 630 – 655).
4. Распределение потока вычислений для получения:
 - а) зависимостей P_a и P_b от диаметров роликов, избытка ширины заготовки, расстояния между фильерами, высоты профиля – команды № 660-1200 ;
 - б) зависимости P_a от модуля Юнга (команды № 661 и 1350 – 1650);
 - в) зависимости P_a от радиуса кривизны профиля R , (команды № 662 и 1660 – 1710) ;
 - г) зависимости P_a от зазора в фильере (команды № 663 и 2100 – 2150);
 - д) зависимости P_b от модуля Юнга, радиуса кривизны профиля, зазора в фильерах (команды № 664 и № 2300 – 2440);
 - е) зависимости кривизны профиля $1/R_0$ от аксиальных деформаций полки, стенки, избытка ширины развертки заготовки, высоты профиля.

Выводы по разделу 4

1. На основе рассмотрения процесса формоизменения заготовки в паре роликов окончательного формообразования, исходя из модели жесткопластичного несжимаемого ортотропного тела, установлено, что деформационные характеристики зависят не только от ширины заготовки, геометрических размеров инструмента, но и от конфигураций предварительных переходов.

2. Выявлен процесс образования поводок при деформировании заготовки без устройства правки. Остаточная кривизна вычисляется методом численного интегрирования и зависит от схемы деформирования, геометрических характеристик инструмента и сечения профиля.

3. Получено основное условие прямолинейности получаемого профиля, откуда выведены требования к разрабатываемому правильному устройству, описана одна из возможных конструктивных реализаций такого устройства.

4. Из условий работы правильного устройства в динамическом режиме, по максимальным значениям силовых характеристик, зависящих от первоначальных поводок, найдены предельные рабочие нагрузки в продольном и поперечном направлениях, использованные затем при разработке технического задания на проектирование правильного устройства и для расчета его конструктивных элементов.

5. Сформулированы ограничения на процесс правки, в частности, дано ограничение на совокупность геометрических характеристик правильного устройства из соображений целостности пластического шарнира; указана область применения устройств с различными конструктивно-геометрическими характеристиками.

5. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА

При производстве мелкосортных профилей высотой до 50 мм и толщиной стенки 0,8...2,5 мм в некоторых случаях со стороны заказчиков технологии предъявляются особые требования к конфигурации угловых зон (например, радиусгиба менее допустимого и наличие утолщения). Профили с такими угловыми зонами изготавливаются только стесненным изгибом. При этом важно выработать подходы к определению допустимых параметров угловой зоны.

5.1. Моделирование уголковой зоны средствами ANSYS

Обычно набор материала в угловой зоне осуществляется за счет торцевого поджатия или осадки криволинейного участка заготовки избыточной ширины в закрытом роликовом калибре, радиусы угловых зон которого соответствуют требованиям чертежа к радиусам кривизны зон сгиба. Соответствующее технологическое оснащение не допускает вариаций характеристик угловой зоны, в то время как высвобождение угловой зоны, преимущественно со стороны внутреннего контура, могло бы расширить возможности технологии в части изменения размерных параметров угловых зон и, в особенности, применяемых материалов. Например, комплект технологического оснащения для производства профиля из алюминиевого сплава оказывается непригодным для изготовления профиля таких же габаритных размеров и толщины стенки из титанового сплава.

Высвобождение угловой зоны может быть односторонним или двусторонним (рис. 5.1), причем одностороннее высвобождение имеет место лишь при определенном условии, а именно: сила торцевого сжатия T должна быть достаточной для посадки наружного контура заготовки на инструмент.

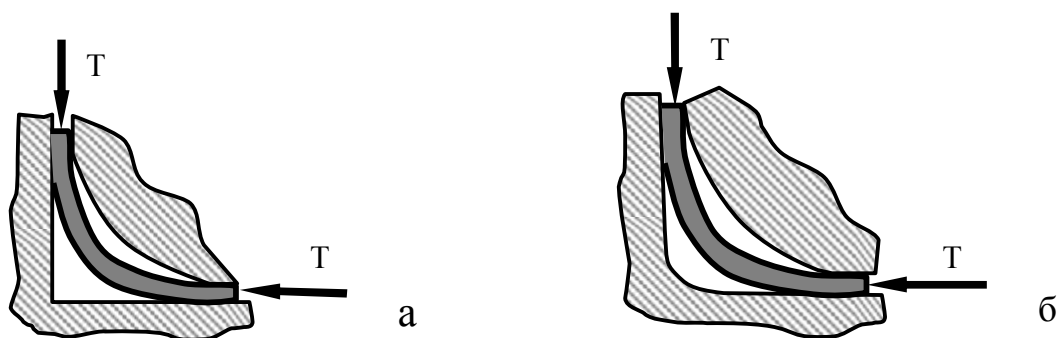


Рис. 5.1. Схемы формовки угловой зоны: а – с двусторонним высвобождением; б – с высвобождением по внутреннему контуру и посадкой наружного контура

Однако выявление условия посадки наружного контура заготовки и сопутствующих распределений напряжений и деформаций в угловой зоне далеко от тривиального. Это связано со сложной зависимостью вида и параметров НДС в заготовке от величины подсадки и ряда других условий

[153]. Например, при посадке наружного контура неопределенными остаются граничные условия для наружного контура.

Можно предположить двоякое поведение заготовки на участках, примыкающих к зоне наиболее интенсивного деформирования: 1) тонкие заготовки будут подвергаться потере устойчивости в форме локального выпучивания с тенденцией к складкообразованию; 2) более толстые заготовки будут давать эффект одностороннего выпучивания с набором толщины на прямолинейных участках, примыкающих к зоне сгиба, что аналогично осадке призматического тела с ограничением по одной из боковых граней.

Известно, что потеря устойчивости заготовки при осадке может иметь место, если наименьший линейных размер сечения отличается от ее высоты более, чем в три раза [154]. С другой стороны, схема формовки профиля по переходам определяет целесообразное значение относительного радиуса кривизны заготовки к переходу, где производят осадку, не более пяти ее толщин [130]. Поэтому рассмотрим подсадку заготовки единичной толщины с изменением ее относительного радиусагиба (радиуса кривизны внутреннего контура) в осевой плоскости формирующих валков с пяти до значения, определяемого величиной подсадки (вертикального перемещения недеформированной части заготовки) (рис. 5.1-а) или условиями ограничения наружного контура зоны сгиба инструментом (рис. 5.1-б).

Для изучения вышеуказанных схем использовали пакет Ansys 7.1 (модуль LS-dyna), основанный на конечно-элементном анализе процессов формообразования и приобретенный по лицензии Ульяновским государственным техническим университетом.¹ В качестве препроцессора использовали программу Solid Works, а постпроцессорную обработку результатов производили встроенными средствами программы.

Поведение моделируемого участка профиля (рис. 5.1-б), разбитого на конечные элементы, представлено на рис. 5.2.

Перед посадкой наружного контура перемещения материальных точек в угловой зоне вблизи биссектрисы угла наиболее интенсивны и имеют линейные траектории, а на примыкающих участках они претерпевают изгиб (рис. 5.3). Такое поведение материала хорошо согласуется с результатами более ранних исследований [153], где установлено, что при торцевом сжатии характер распределения касательных напряжений имеет вид двугорбой кривой с провалом на биссектрисе угла. Из того же рис. 5.3 видно, что наличие деформаций сдвига существенно отдаляет данную схему деформирования от схемы чистого изгиба, где справедлива гипотеза плоских сечений.

Анализ напряжений вдоль биссектрисы угла с точкой отсчета, лежащей на внутреннем контуре, показывает, что напряжения в окружном направлении на внутреннем и наружном контурах существенно отличаются по абсолютной величине (рис. 5.4). В классическом решении задачи чистого изгиба они должны были бы совпадать. Из того же рис. 5.4 следует, что нейтральный слой напряжений мигрирует в сторону наружного контура (см. точку схождения

¹ В исследовании принимал участие соискатель по кафедре ОМД УлГТУ В.В. Левщанов

графиков на рис. 5.4) в отличие от чистого изгиба, где нейтральный слой напряжений (НСН) смещается к внутреннему контуру на величину:

$$DS = \frac{r + R}{2} - \sqrt{r \cdot R}, \quad (5.1)$$

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

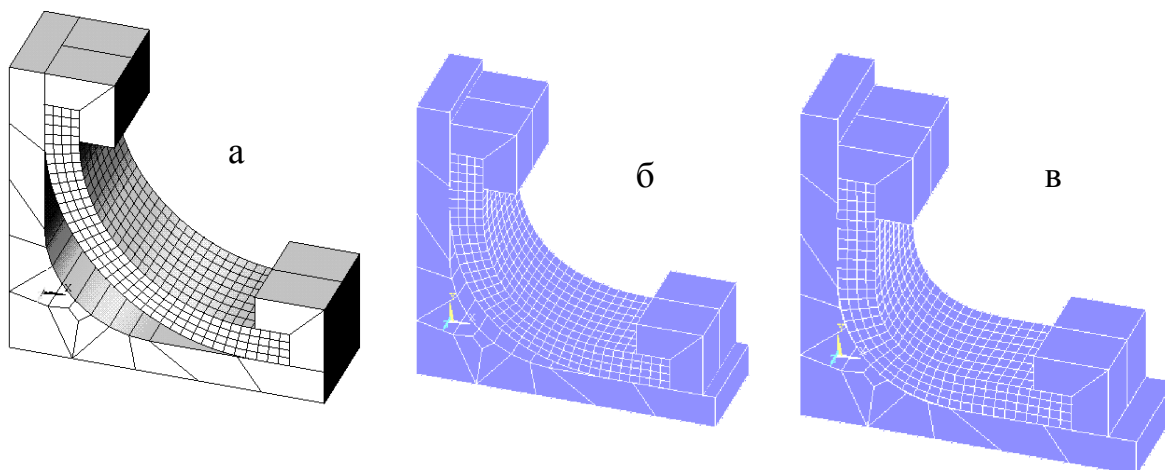


Рис. 5.2. Ход процесса деформирования: а) – исходное положение; б) – положение заготовки перед контактом; в) – посадка наружного контура заготовки

В данном случае (43 шаг нагружения) величина смещения НСН составляет $0,1S_0$ (S_0 – толщина исходной заготовки). Значения напряжений в окружном направлении и положение НСН свидетельствуют о разгрузке наружного контура зоны сгиба, что позволяет производить гибку заготовки на меньшие радиусы, чем те, что традиционно приводятся в многочисленных справочниках по холодной штамповке. По рис. 5.4 можно также установить вид напряженного состояния по значению фактора Лоде [154]:

$$n_s = \frac{2 \cdot s_2 - s_1 - s_3}{s_1 - s_3}, \quad (5.2)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения.

Подставляя соответствующие значения напряжений с рис. 5.4 в формулу (5.2), получаем, что практически во всех точках биссектрисы угла выполняется условие $v_\sigma \approx 0$, то есть имеет место случай плоской деформации. Для принятой модели этот вывод вполне закономерен.

Деформационные характеристики угловой зоны также соответствуют реальному процессу и результатам работы [112]. Уровень окружных деформаций на наружном контуре не превышает 10 %, а на внутреннем контуре составляет

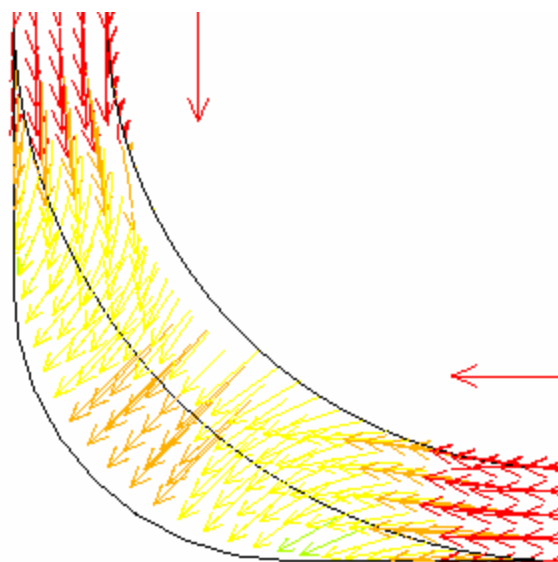


Рис. 5.3. Перемещения узлов деформируемой сетки модели

25 % (рис. 5.5). Следовательно, наружный контур разгружается за счет действия торцевых сил, внутренний нагружается дополнительно (при чистом изгибе окружная деформация наружного контура составляет около 20 % при той же геометрии угловой зоны).

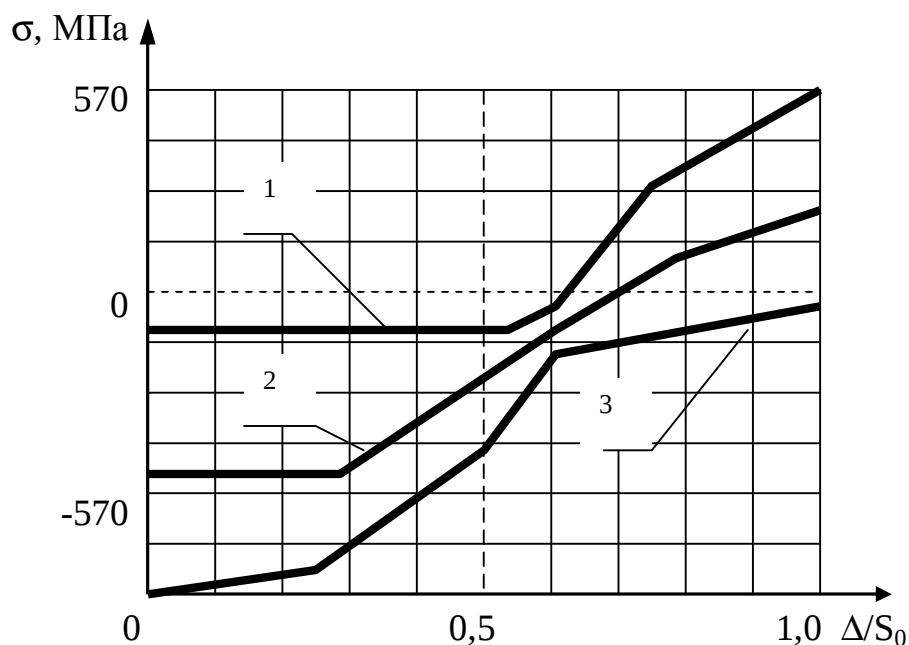


Рис. 5.4. Распределение главных напряжений по биссектрисе угла: 1 – радиального; 2 – продольного; 3 - окружного

Анализ двух остальных деформаций (радиальной и продольной) показывает, что условие плоской деформации выполняется (продольная деформация в любой точке заготовки на биссектрисе угла не превышает 0,4 %). Условие несжимаемости также выполняется [154]:

$$\sum_{i=1}^3 e_i = 0, \quad (5.3)$$

где ϵ_i – i – я главная деформация.

Аналогичные закономерности деформирования наблюдаются и на других этапах нагружения до момента контакта заготовки с дугообразным участком

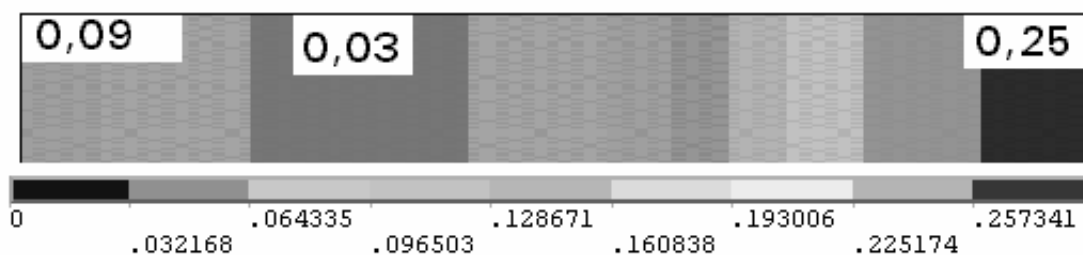


Рис. 5.5. Распределение окружных деформаций вдоль биссектрисы угла (вверху) от внутреннего контура к наружному (справа налево) и калибрующая шкала (внизу)

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

Уменьшение продольной деформации возможно за счет переднего поджатия, что существенно усложняет технологию и на практике применяется редко, хотя и позволяет получить существенное утолщение в угловой зоне (до 20...30 %). Обычно заказчик заявляет желаемое утолщение в зоне сгиба до 5...10 %, что достижимо за счет выбора ширины заготовки в обеих схемах рис. 5.1, как это показали исследования процессов в среде Ansys 7.1/8.0 по схемам полного высвобождения наружного контура (рис. 5.1-а), а также со скруглением инструмента под наружный контур на радиусы двойной и тройной толщины заготовки.

Таким образом, высвобождение угловых зон за счет конструкции формующего инструмента позволяет расширить возможности технологии в части изменения конфигураций угловых зон изготавливаемого профиля. Торцевое сжатие дает возможность разгрузить наружный контур зоны сгиба по деформациям в 2,0...2,5 раза, что обеспечивает получение радиусовгиба меньше допустимых при наличии утолщения, повышающего несущую способность профиля. Использование конечно-элементного анализа для исследования процессов формообразования позволяет совершенствовать технологию профилирования в роликах с экономией ресурсов и обеспечением высокой точности расчетов.

5.2. Допустимые и предельные параметры угловой зоны

5.2.1. Ограничения в угловой зоне

Принципиальный путь определения предельных характеристик процесса деформирования в общем случае указан в работах [155, 156], однако специфика стесненного изгиба создает серьезные затруднения в использовании данного подхода. Для обычной гибки допустимый радиус кривизны посредством оценки интенсивности деформаций сдвига с учетом напряженного состояния был определен в работе [156]. Однако здесь не принималось во внимание изменение толщины листа, а верхняя оценка для интенсивности деформации сдвига принималась равной критическому значению последней при испытании образца на растяжение. В более поздних исследованиях [157] указывается, что разрушение в пластической области зависит в большой степени и от промежуточных напряженных состояний. Кроме того, при достижении критических значений

деформаций при СИ происходит разрушение внутреннего контура в отличие от обычной гибки, где разрушается внешний контур.

Один из подходов к этой проблеме изложен в нашей работе [158], использующей результаты работ [116, 115, 112]. Исследуем плоское деформированное состояние в зоне сгиба, считая материал несжимаемым, ортотропным и упрочняемым по степенному закону. В работе [159] показано, что для технологических процессов, где пути деформирования являются сложными, необходимо учитывать эквивалентную накопленную деформацию по формуле $e_i = \int de_i$. Однако в нашем случае процесс можно считать квазимонотонным, поэтому в качестве накопленной деформации можно взять одну из главных деформаций в плоскости сечения.

Идея состоит в том, что при больших торцевых усилиях на внутренней поверхности заготовки начинается гофрирование материала, то есть теряется устойчивость деформирования. Данному состоянию должна соответствовать и определенная величина подкасательной на диаграмме Т–Г [160], соответствующая предельному состоянию:

$$DK = \left. \frac{TdG}{dT} \right|_K, \quad (5.4)$$

где ΔK – длина подкасательной; Т, Г – интенсивность касательных напряжений и интенсивность деформаций сдвига соответственно.

Расчет по формуле (5.4) с использованием результатов разд. 3 дает [158]:

$$DK = \frac{2}{n\sqrt{3}} \ln \left[\frac{K^2(0, h_f, a) a_0 + (h_f/2) \cdot K^2(h_f/2, h_f, a) + h_f \cdot \sqrt{1 - K^2(h_f/2, h_f, a)} \cos f}{a_0 K^2(0, h_f, a)} \right]^{1 - \frac{f}{f_{PR}}},$$

где n – показатель упрочнения; a_0 – длина полуоси аппроксимирующего эллипса в направлении биссектрисы угла, приведенная к толщине заготовки, ϕ – текущее значение угла; ϕ_{PR} – условный предельный угол, под которым прямая разделяет пластическую и упругую зону (см. разд. 3).

Правая часть формулы (5.4) характеризует величину подкасательной на диаграмме Т–Г (рис. 5.6), которая при простом нагружении может быть удовлетворительно представлена результатами экспериментов по одноосному растяжению образца [160]. При этом считается справедливой «гипотеза единой кривой».

Последняя формула может быть упрощена. Гофрирование начинается в месте наибольшей кривизны вблизи биссектрисы угла, следовательно, можно положить $\phi = 0$. После небольших преобразований получим [158]:

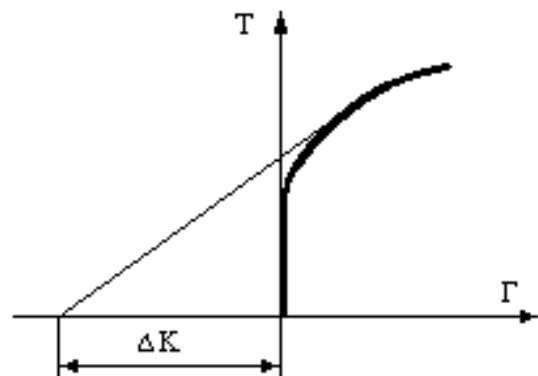


Рис. 5.6. Определение величины подкасательной по диаграмме Т–Г

$$C = \left[\exp\left(\frac{n \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot DK\right) / \left(\frac{h_f}{2} \cdot K_c^2 + h_f \cdot \sqrt{1 - K_c^2} \right) \right], \quad (5.5)$$

где C – кривизна внутреннего контура на биссектрисе, приведенная к толщине заготовки; K_c – коэффициент соотношения полуосей эллипса, отнесенный к срединной поверхности (определяется усреднением функции $K(\eta, \eta_f, \alpha)$ на внутреннем и наружном контурах).

Выражение (5.5) определяет условия, при которых происходит потеря устойчивости деформирования. Величина подкасательной легко может быть определена по кривой "Т - Г", поскольку в случае простого нагружения кривая упрочнения является выпуклой, следовательно, гарантируется однозначность. Методика нахождения ΔK является чрезвычайно простой. Зная, что гофрирование предшествует разрушению материала на внутреннем контуре при исчерпании ресурса пластичности примерно на 4/5 (разность измерений микротвердости зоны сгиба на образцах с первыми признаками гофрирования и на разрушенных образцах при одноосном растяжении находилась в пределах от 16 до 23%) следует взять соответствующую точку и через нее провести касательную к кривой, а затем измерить величину подкасательной (см. рис. 5.6).

В качестве примера использования полученных результатов приведем зависимости предельной кривизны и предельного утолщения от угла подгибки для листового материала 01420. Как видно из рис. 5.7 и 5.8, с увеличением угла подгибки кривизна имеет тенденцию к росту, а утолщение – к спаду. Это объясняется тем, что с увеличением угла подгибки на внутреннем контуре создаются условия значительного сжатия приповерхностных волокон и при некоторых критических значениях сжимающих усилий происходит гофрообразование, предшествующее разрушению, причем сжатие волокон увеличивается с ростом утолщения и увеличением кривизны за счет увеличения угла подгибки и величины торцевого сжатия.

Для двух схем с углами подгибки 72 и 90° при гибке прокаткой экспериментально исследовали уголки с различным утолщением,

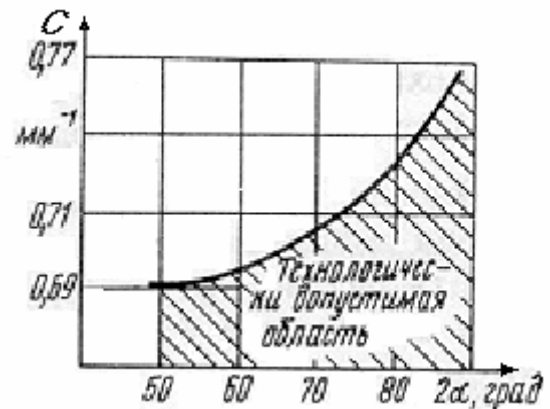


Рис. 5.7. Зависимость критической кривизны внутреннего контура от угла подгибки

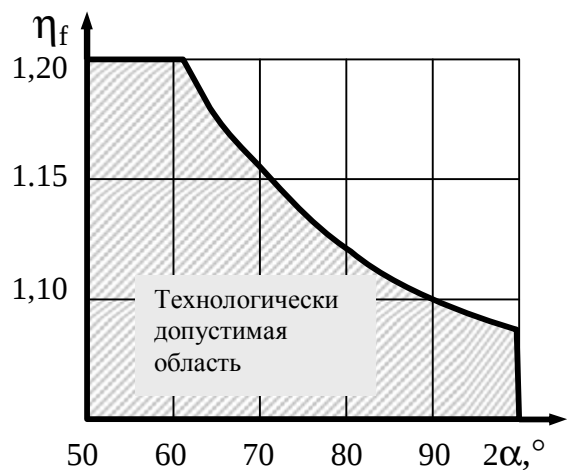


Рис. 5.8. Зависимость критической толщины зоны сгиба от угла подгибки

создаваемым за счет избыточной ширины трапецевидной заготовки толщиной 1,2 мм. Уголки, залитые в эпоксидную смолу, после изготовления шлифа исследовались на микроскопе МИМ-8. Измеряли утолщение η_f и радиус кривизны по методике разд. 3, а также определяли начало потери устойчивости деформирования по высоте гофра (высота 5 мкм - граница неустойчивости). Впрочем, при увеличении в 200 раз эту границу можно наблюдать визуально. Полученные результаты представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Критические параметры угловой зоны

Угол подгибки 2α , °	Утолщение η_f	Радиус гиба, $(r_B)/s_0$
72	1,12... 1,15	1,38... 1,42
90	1,08 ... 1,13	1,28 ... 1,35

Эти данные в значительной степени совпадают с данными рис. 5.7 и 5.8. Вычисленные значения среднеквадратического отклонения не превышают 0,02, что свидетельствует о достаточной надежности экспериментальных данных [161].

При разработке технологических процессов гибки профилей из авиационных материалов следует принимать во внимание технологически допустимую область (рис. 5.7, 5.8), в которой можно получать изделия без дефектов внутреннего контура.

Отметим, что данный подход к решению задач предельного деформирования в условиях одноосного нагружения был использован Консидере (по данным работы [162]). Здесь этот подход применен к случаю более сложного вида напряженно-деформированного состояния.

Более широкие экспериментальные исследования предельных параметров в угловой зоне при формообразовании профилей в роликах представлены в работах [122 – 126], часть которых включена в отраслевую НТД. Применительно к кромкогибочным устройствам предельные параметры угловой зоны основательно изучены А.В. Скрипачевым [17, 163]. В частности, для титанового сплава ОТ-4 – $\eta_f \leq 1,11$, $r_B/s_0 > 1$; для композита АБМ-1 – $\eta_f \leq 1,03$, $r_B/s_0 > 4$ [163]. Однако характер ограничений при формообразовании дисперсных, волокнистых и слоистых композиционных материалов стесненным изгибом имеет свои особенности.

5.2.2. Ограничения при формовке композитов

Двухфазные композиты с бериллиевой b - фазой [164] обладают малой плотностью ($\rho = 2,35 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), относительно высокими прочностными свойствами (в нагартованном состоянии $\sigma_B = 600 \text{ МПа}$), значительной выносливостью и повышенной коррозионной стойкостью (не склонны к межкристаллитной кор-

розии и коррозии под напряжением), что и обеспечивает их широкое использование в авиастроении.

Однако изготовление изделий из двухфазных композитов представляет собой хотя и разрешимую, но довольно сложную технологическую задачу в связи с ограничениями на предельно допустимый радиус гибки [165, 108]. Например, для материала АБМ-1 $\bar{r}_{\min} = 10-12$ при гибке в холодную, и $\bar{r}_{\min} = 3-4$ при гибке с нагревом до $280-350^\circ\text{C}$. При этом разрушение может начинаться как на наружном, так и на внутреннем контуре.

В работе [166] разработан подход к учету влияния дисперсных частиц при формообразовании стесненным изгибом, основанный на статистическом подходе [167, 168]. При решении задачи предел текучести материала задавали в виде:

$$T(h, x) = s_s^a + s_s^a \left(\frac{s_s^b}{s_s^a} - 1 \right)^g \cdot f(h, x), \quad (5.6)$$

где s_s^a - предел текучести материала матрицы; s_s^b - предел текучести материала наполнителя; g - экспериментальная константа для данного композита; $f(h, x)$ - мультипликативная функция, учитывающая объемное содержание b - фазы и локализацию частиц наполнителя.

Мультипликативная функция $f(h, x)$ определена следующим образом:

$$f(h, x) = q^{1/3} \cdot I(h - h_i) \cdot I(x - x_i), \quad (5.7)$$

где q - объемное содержание дисперсной фазы в композите, I - индикаторная функция, учитывающая случайный характер распределения b - фазы, равная нулю при расположении точки в a - фазе, и, равная единице - при расположении точки в i -ой частице b - фазы.

В предельном случае, когда $q \rightarrow 0$ формула (5.6) переходит в константу для однородного тела, состоящего только из a - фазы; при $q \rightarrow 1$, ввиду отсутствия усреднения в формуле (5.7), также получаем условие пластичности для однородного материала, но уже с пределом текучести b - фазы. Промежуточный случай дает вполне реальное состояние материала за счет введения экспериментальной величины g .

Ограничиваясь качественным анализом ограничений ввиду громоздкости формул, определяющих НДС, отметим три ограничения на деформируемость материала в зоне сгиба: во-первых, это - повреждение поверхности внутреннего контура, связанное с трансляционным и ротационным характером движения частиц, с их выходом на поверхность внутреннего контура в процессе деформирования; во-вторых, в слое вблизи внутреннего контура с увеличением тангенциальных сжимающих напряжений происходит значительный рост напряжений в зерне, что при достижении последними критических значений приводит к его разрушению; в-третьих, при небольших силах тангенциального сжатия происходит разрушение наружного контура вследствие исчерпания ресурса пластичности материала.

Механизм первого ограничения может быть представлен следующим об-

разом. С увеличением тангенциального сжатия случайным образом распределённые частицы, расположенные в зоне сжатия вблизи биссектрисы угла, совершают на первоначальных этапах поступательное движение, поскольку градиент тангенциального напряжения по толщине заготовки невелик. Затем, при последующем увеличении тангенциального сжатия и градиента напряжений соответственно, происходит и поворот частиц. Однако такой механизм в большей части характерен для композитов с относительно малым объемным содержанием дисперсных частиц. Для композитов с высоким содержанием дисперсных частиц $q > 0,3$ возможен несколько иной механизм повреждения внутреннего контура, а именно, с увеличением тангенциального сжатия частицы, находящиеся в сжатой зоне вблизи внутренней поверхности зоны сгиба, могут образовывать кластеры, из которых выход частиц на поверхность возможен как за счет поворота отдельных частиц под воздействием других, так и путем "прорезания" (выдавливание частицы соседними частицами). Последнее характерно для деформирования в горячем состоянии. Данный вид разрушения характерен и для волокнистых композитов типа ВКА (рис. 5.9-а) [126].

Частицы дисперсной фазы еще до деформации находятся в сжатом состоянии, происхождение которого – остаточные термонапряжения, появляющиеся вследствие различия коэффициентов термического расширения матрицы и частиц при охлаждении листа на стадии его изготовления.

Остаточные термонапряжения имеют порядок предела текучести и не зависят от размеров частиц (волокон). Наложение дополнительных сжимающих напряжений s_x может приводить к разрушению волокон или зерен (рис. 5.9-б) с вероятностью:

$$l = \left(\frac{k_p s_x d^{1/2}}{q^{1/3}} \right) - k_0, \quad (5.8)$$

где l – вероятность разрушения частиц; d – средний диаметр частицы; k_p, k_0 – постоянные данного материала, определяемые согласно работе [168].

Разрушение композита по наружному контуру пред-

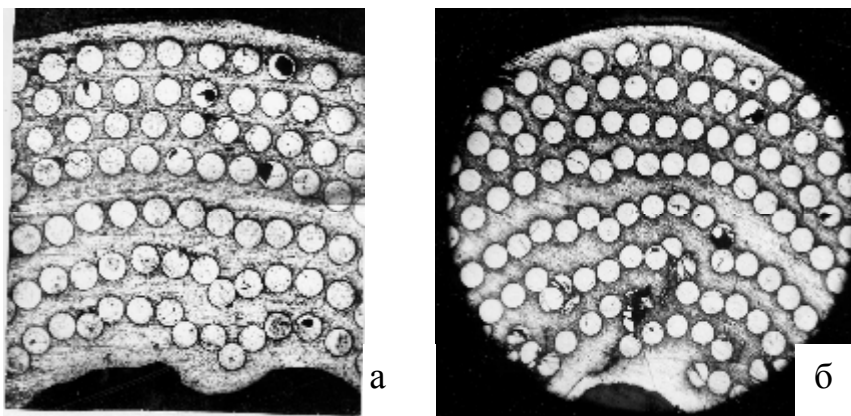


Рис. 5.9. Предельные состояния в ВКМ: а) – выдавливание волокон; б) – разрушение волокон

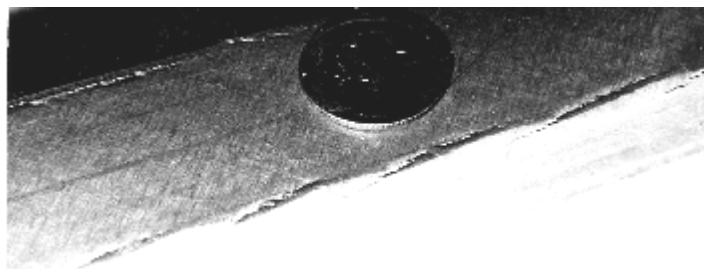


Рис. 5.10. Разрушение наружного контура композиционного материала ВКА-2

ставлено на рис. 5.10.

Формообразование слоистых композитов методом СИ сталкивается с проблемой расслоения материала (рис. 5.11-а). Профили, представленные на рис. 5.11, изготовлены в кромкогибочном устройстве со смещенной осью² [169, 170, 40]. Для выявления причин расслоения материала вблизи уголковой зоны процесс был смоделирован в среде ANSYS (рис. 5.12), откуда видно подобие формы заготовки изображению уголка на рис. 5.11-а. Разумеется, характеристики НДС доступны для визуализации на каждом этапе эволюции модели.

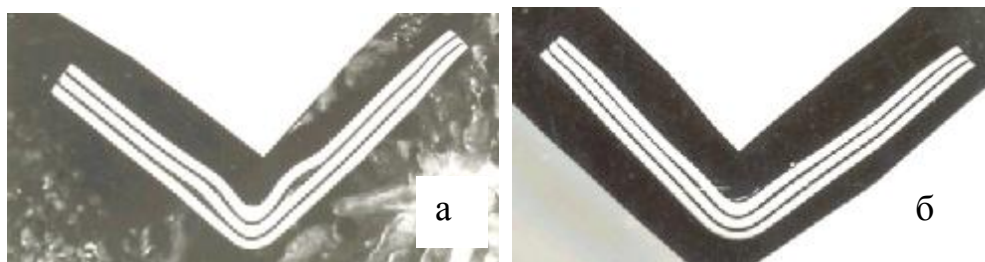


Рис. 5.11. Уголковый профиль из композита АЛОП-41:
а) – с расслоением вблизи зоны сгиба; б) – без расслоений

Качественный уголковый профиль получен с использованием прижимных планок особой формы на кромкогибе специальной конструкции, что явилось предметом авторских свидетельств на изобретение [170, 40]. Кромкогибочные устройства весьма удобны для проведения исследований формирования угловой зоны профиля, однако для практики не имеют большого значения.

Гибка слоистых композитов в роликах весьма затруднена ввиду полного расслоения заготовки (рис. 5.13) в межклетьевом пространстве. Хотя для некоторых материалов (например, СИАЛ) возможны режимы, позволяющие получить профили простых конфигураций в роликах

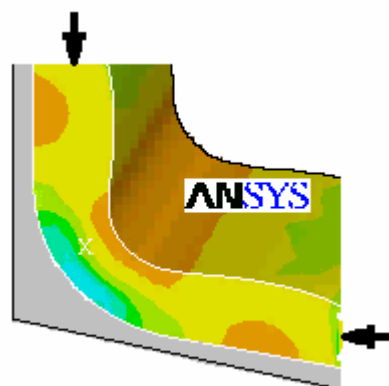


Рис. 5.12. Модель формообразования уголка из АЛОП-41



Рис. 5.13. Расслоение заготовок композита при гибке в роликах

методом СИ. В ряде случаев имеют место расслоения на торцах заготовки из-за приложения торцевых сил (рис. 5.14-а). При малых радиусахгиба как и у моно материалов происходит разрушение наружного контура зоны сгиба (рис. 5.14-б). В 2002 году по договору с ВИАМ разработана технология производства

² Экспериментальные работы по материалу АЛОП-41 выполнены А.Г. Проскуряковым

длинномерных уголкового профиля из материала СИАЛ; изготовлены и переданы в ВИАМ для испытаний опытные партии профилей с радиусами порядка 2 – 4 толщин исходной заготовки (рис. 5.15).

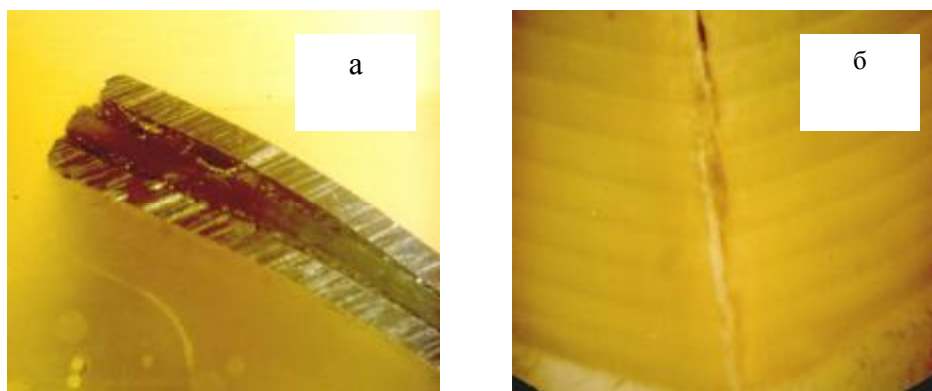


Рис. 5.14. Дефекты композита СИАЛ: а) – торцовое расслоение; б) – разрушение наружного слоя

К сожалению, до настоящего времени не удалось внедрить в отрасль авиастроения профили из композиционных материалов, изготовленные методом СИ. Это связано как с технологической сложностью данной проблемы, так и с незначительным финансированием работ (с 1994 г. по 2002 г. инвестиции в разработку технологии производства профилей по нашему направлению отсутствовали).



Рис. 5.15. Зона сгиба профиля из СИАЛ

Следует отметить, что получение кондиционного профиля из слоистого композита требует увеличения числа клеток в 2 – 3 раза по сравнению с производством профилей из традиционных авиационных сплавов.

Выводы по разделу 5

1. Моделирование угловой зоны с двусторонним высвобождением и посадкой наружного контура средствами ANSYS показывает, что при умеренных силах торцевого сжатия происходит набор толщины в угловой зоне, а при дальнейшем росте торцевого сжатия происходит утолщение прямолинейных участков, примыкающих к зоне сгиба.

2. деформирование заготовки происходит в условиях, близких к плоской деформации, что подтверждается соответствующими значениями коэффициентов Лодэ. Нейтральный слой деформаций смещается к наружному конту-

ру, а абсолютные значения окружных деформаций наружного контура примерно в 2,5 раза меньше, чем внутреннего контура.

3. Внутренний радиусгиба и утолщение зоны сгиба имеют определенные диапазоны (технологически допустимые области), где отсутствуют нарушения сплошности материала заготовки. Например, для материала 01420 при гибке на 90° допустимый диапазон относительного утолщения составляет 0,08...0,13, а диапазон допустимых относительных внутренних радиусов составляет 1,28...1,35.

4. При формовке композитов, в отличие от мономатериалов, существуют три вида разрушений материала в зоне сгиба:

- разрушение зерна вблизи внутреннего контура;
- прорезание внутреннего контура частицами вследствие их вращения или выдавливания другими зернами;
- разрушение наружного контура при малых степенях торцового сжатия.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЕГО ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ В ОЧАГЕ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА

6.1. Методика проведения экспериментов

6.1.1. Цели, задачи и основные параметры исследований

Для установления влияния основных параметров процесса формообразования профилей на их прямолинейность при стесненном изгибе был проведен комплекс экспериментов в соответствии с разработанной методикой. Целью исследований является раскрытие механизма и установление закономерностей процесса правки профилей при их формообразовании.

Основными **задачами** исследований являются:

- выявление технологических параметров процесса формообразования профилей, влияющих на прямолинейность профилей;
- определение характерных особенностей (стадий) работы правильного устройства в динамическом режиме;
- определение величин и диапазона изменений силовых и кинематических параметров процесса правки в зависимости от различных технологических факторов (ширины заготовки и свойств материала);
- сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований с целью оценки сходимости результатов.

Основными **параметрами**, влияющими на прямолинейность профилей, получаемых методом стесненного изгиба на гибочно-прокатных станках, являются силовые, геометрические и кинематические параметры (табл. 6.1).

В качестве основных **методов** исследования применялись:

- метод тензометрирования выбранных параметров;
- геометрические методы измерения линейных и угловых величин.

Методика предусматривала проведение экспериментов в определенном порядке в соответствии с методом Бокса-Уилсона; содержание исследований соответствовало поставленным задачам.

В качестве оборудования для проведения экспериментальных исследований использовались гибочно-прокатные станки ГПС-170, ГПС-200.

Эксперименты проводили на семи типоразмерах профилей рис. 4.3, два из которых имели несимметричную форму поперечного сечения. На каждый профиль был изготовлен комплект индивидуальной формующей и правильной оснастки. В качестве исходной заготовки для изготовления профилей использовали листы толщиной (0,8...2,0) мм из сплавов О1420Т, Д16Т, Д16М, В95пчАМ, В95пчАТ2, 1163АТВ, О1420С и сплавов Д16, 1163, В95 в свежезакаленном состоянии. Для всех типоразмеров профилей имелось по 18 – 20 заготовок длиной от 3 до 7 метров, различной ширины от В до (В +5) мм (здесь В – ширина развертки сечения профиля). Каждая заготовка определенной ширины дублировалась. Все заготовки маркировались ударным методом.

Таблица 6.1

Параметры, определяющие прямолинейность профиля

Группы параметров	Обозначение параметра	Описание параметра
Силовые	M	Изгибающий момент внутренних сил, создающий прогиб профиля
	M _{пр}	Момент внешних сил, передаваемый правильным устройством, работающим в динамическом режиме, через участок готового профиля в очаг деформации
	P _в	Сила, действующая на правильный блок и перемещающая его в необходимое для правки положение
	P _а	Аксиальная сила, действующая на очаг деформации в паре роликов окончательного формообразования
Геометрические и технологические	*	Размеры и форма готового профиля и заготовки
	*	Симметричность поперечного сечения
	*	Превышение ширины заготовки над шириной развертки поперечного сечения готового профиля
	*	Размеры и форма роликов предварительных и окончательного переходов
	*	Размеры и форма правильной оснастки (фильер и роликов)
	*	Величина и точность установки зазоров в формующих калибрах
	σ ₀₂	Условный предел текучести материала
Кинематические	Δl ₁	Перемещение осей первой фильеры правильного блока (смещение осей второй фильеры вычисляется)
	Δl ₂	Смещение общей оси фильер (оси коромысла) правильного блока
* – комбинированные параметры (набор показателей)		

Для обеспечения контроля оснастки были проведены замеры требуемой твердости, чистоты поверхности и точности изготовления рабочих контуров роликов и фильер с целью их соответствия чертежу.

При настройке станка и оснастки производились замеры:

- зазора между поверхностями роликов окончательного перехода, формующих полки профиля;

- расположения оси прокатки;
- расположения оси правки;
- зазоров в формующих калибрах предварительных;
- диаметров роликов;
- предварительных регулировок правильного устройства.

При проведении экспериментов измеряли:

- поводки профилей: прогиб, саблевидность, скручивание;
- перемещения элементов самонастраивающегося правильного блока;
- смещение центра первого калибра относительно оси правки;
- смещение центра коромысла относительно оси правки;
- силы:
 - а) действующие на правильный блок в аксиальном направлении, R_a ;
 - б) действующие на правильный блок в вертикальном направлении, R_v ;
 - в) возникающие на коромыслах при работе устройства в динамическом режиме, R_f (Мизг).

Кроме того, проводилась оценка изменения силы распора, действующей в очаге деформации заготовки в последней паре формующих валков $R_{расп}$.

6.1.2. Установка для замеров величин основных параметров правки

Для обеспечения замеров силовых параметров процесса и перемещения элементов правильного блока в динамическом режиме, а также с целью проверки и уточнения теоретических положений была создана экспериментальная правильная установка, разработанная на основе предложенной схемы предупреждения поводок профилей.

Схема установки изображена на рис. 6.1.

6.1.2.1. Конструкция установки

На массивной станине 1, через установочные плиты 2, 3 размещается обойма 4 с возможностью вертикальной, горизонтальной и угловой регулировки с помощью болтов 5 и 6, червяка 7 и зубчатого сектора 8. На обойме 4 с помощью шарниров 9 закреплены две штанга 10, на которых позиционируются с помощью пружин 11 ползушки 12. Подпружиненные ползушки 12 имеют возможность перемещения по штангам 10 и имеют шарниры 13, на которых расположены коромысла 14, имеющие симметрично расположенные шарниры 15, несущие корпуса 16 правильных калибров 17, 18. Для обеспечения попадания профиля из первого калибра во второй имеется верхний и нижний ловители 19 и 20, связывающие между собой ползушки 12.

Измерительная система содержит опору 22, жестко закрепленную на станине 1. На опоре шарнирно установлены две измерительные балки 23 и 24, соединенные с центром шарнира 15 корпуса 16 первого калибра 17 и центром шарнира 13 коромысла 14 соответственно.

Силовая балка 25 жестко закреплена на опоре 22 и в исходном положении удерживает весь блок через хомут 31 в горизонтальном положении, предотвращая поворот относительно шарнира штанг 10 под действием сил тяжести.

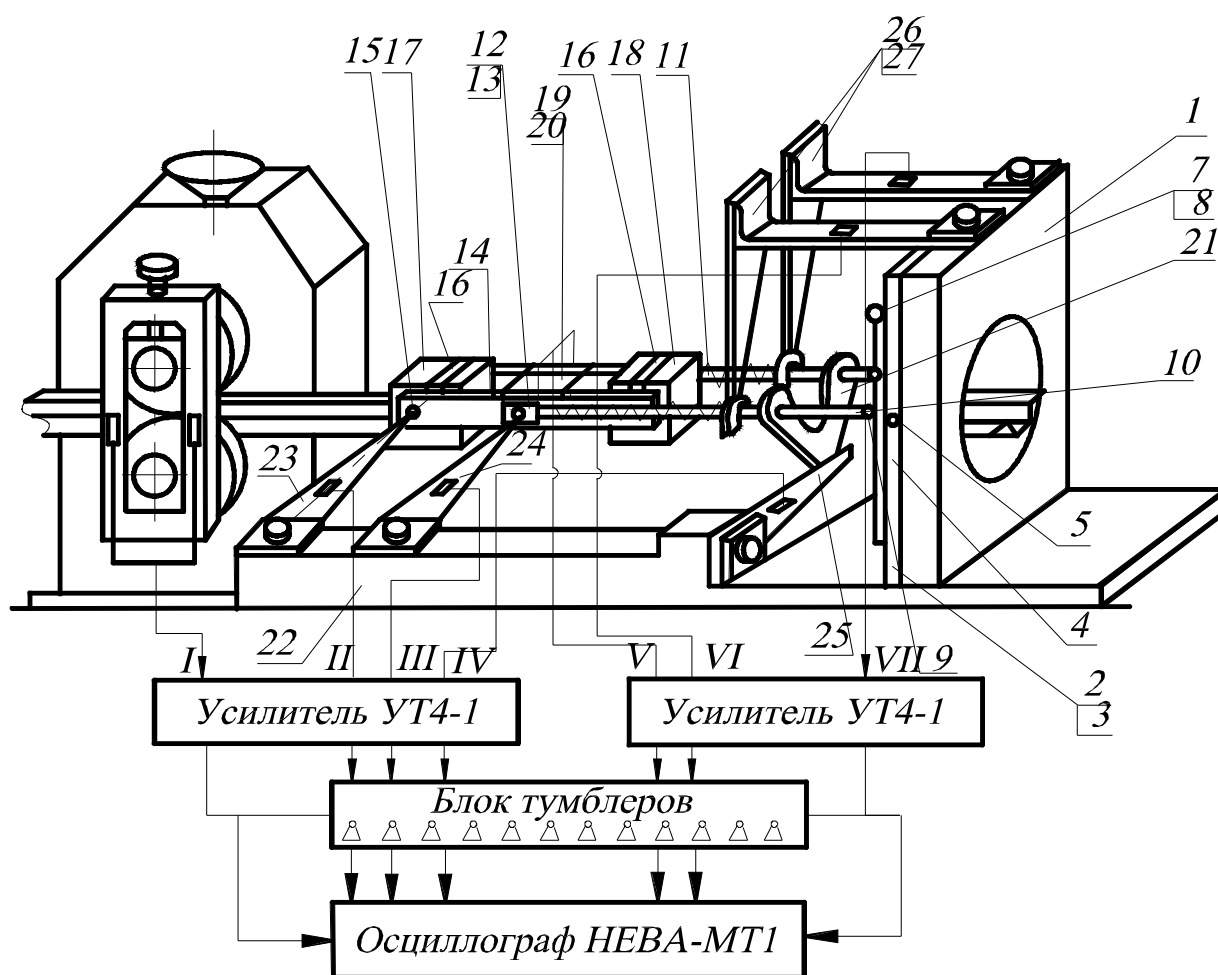


Рис. 6.1. Экспериментальная правильная установка

Силовые балки 26 и 27 жестко закреплены на станине 1; конечные части их расположены между горизонтальными пружинами 11 и буртами штанг 9.

6.1.2.2. Средства измерений и регистрации

Для проведения всего комплекса исследований использовались следующие приборы и инструменты:

- Универсальный инструментальный микроскоп УИМ-23;
- Микроскоп металлографический МИМ-7;
- Прибор для измерения микротвердости ПМТ-3;
- Профилометр;
- Усилитель тензометрический;
- Осциллограф НЕВА-МТ.

Универсальные мерительные средства: микрометры, индикаторы, угломеры, штангенциркули, набор эталонных грузов, динамометры.

Тензометрирование параметров процесса правки [56, 58] производили по усилительной схеме с применением тензометрической станции на несущей частоте УТЧ-1 и светолучевого осциллографа с ультрафиолетовой записью НЕВА-

МТ1. Конструкции упругих элементов датчиков и их расположение на базовом оборудовании показаны на рис. 6.2.

6.1.2.3. Тарировка аппаратуры

Тарировка измерительных каналов проводилась путем прямого нагружения датчиков, установленных в рабочие положения на правильном устройстве. Схема сборки и тарировки представлена на рис. 6.3. Перемещение осей шарниров правильного калибра и коромысла измерялось штангенциркулем с точностью $\pm 0,1$ мм.

Тарировочные графики измерительных каналов исследуемых параметров приведены на рис. 6.4.

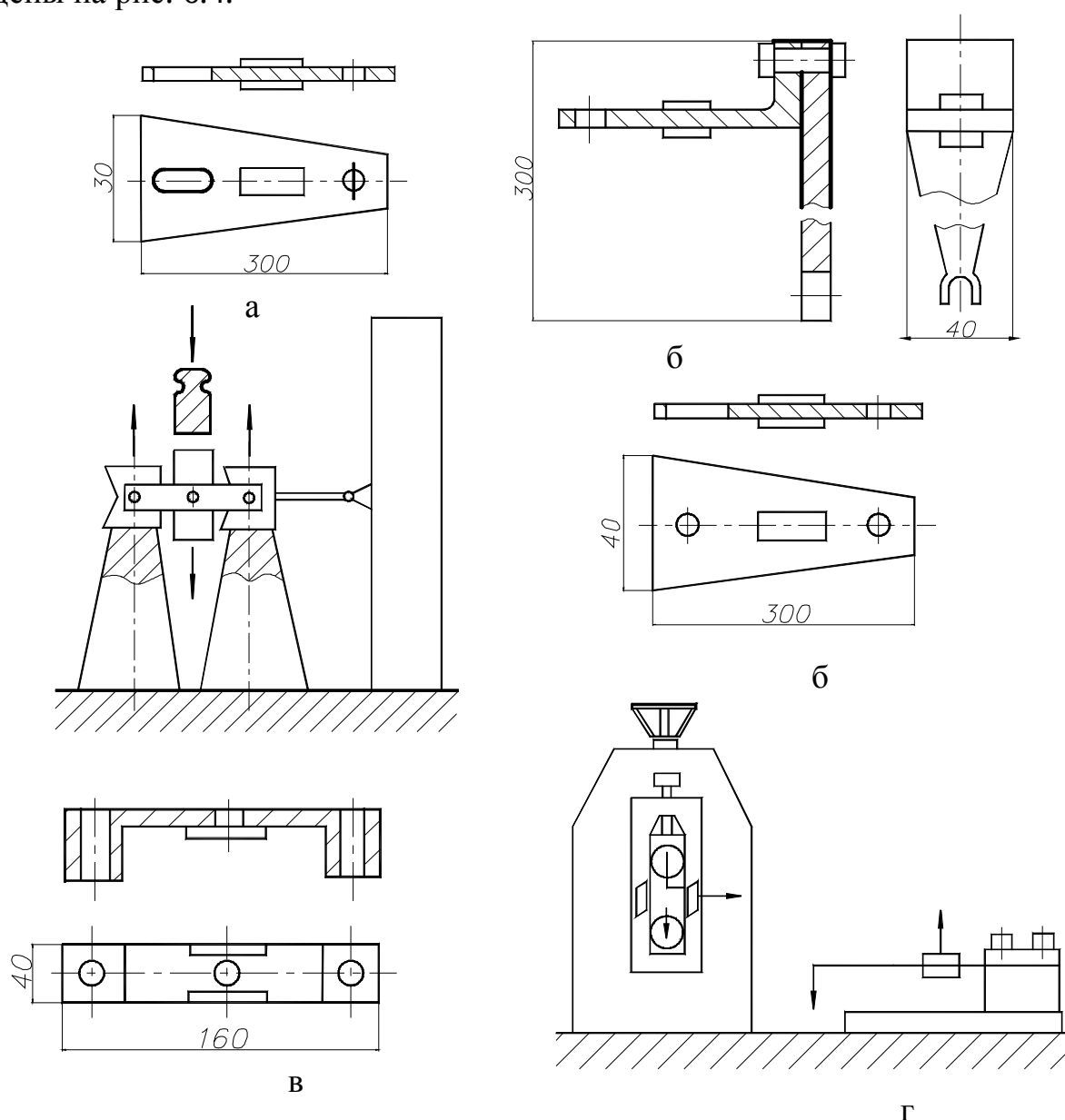


Рис. 6.2. Схемы тарировки датчиков измерительной системы:
а – перемещения осей фильер и центра коромысла; б – вертикального и горизонтального усилий; в – изгибающего момента на коромысле; г – распирающих усилий

Графики имеют линейную зависимость амплитуды выходных сигналов (A) во всем исследуемом диапазоне, как в области положительных так и отрицательных значений параметров (на рис. 6.4 представлены лишь их положительные значения).

Перед тарировкой производилась предварительная оценка чувствительности измерительных каналов и подбор коэффициентов усиления путем записи осциллограммы при прокатке профилей. При этом проверялись и экстремальные случаи нагружения правильного устройства.

Тарировка канала измерения распирающего усилия окончательной клетки производилась с помощью тарировочной балки равного сопротивления полурасчетным методом [56, 58].

Таким образом, установка позволяет записать перемещение правильных калибров Δl_1 , смещение центра коромысла Δl_2 , аксиальную силу P_a , передаваемую в очаг деформации; силу, действующую на правильный блок в вертикальной плоскости P_v ; момент на коромысле $M_{изг}$ и распирающую силу в клетке окончательного формообразования $P_{расп}$.

Остальные параметры процесса зависимы от указанных выше факторов и могут быть получены расчетным путем.

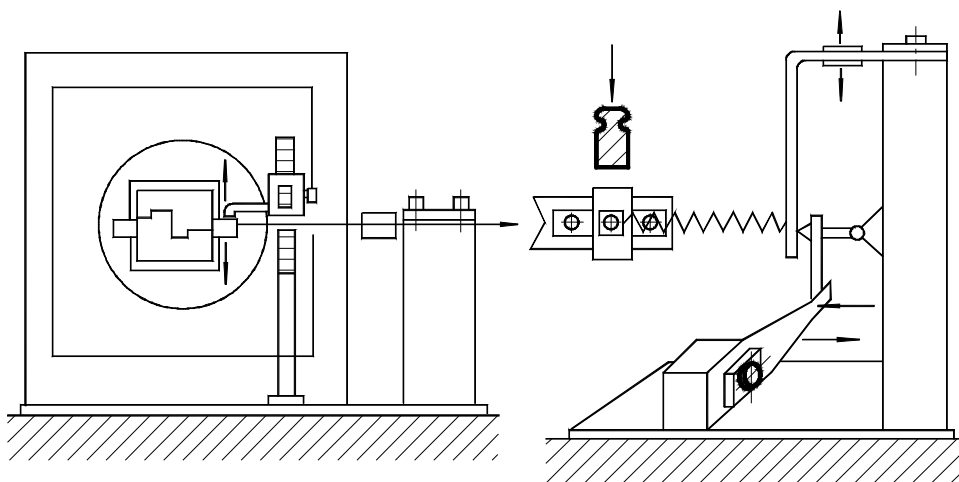


Рис. 6.3. Схема сборки и тарировки измерительных каналов и настройка правильного блока в вертикальной плоскости

6.1.2.4. Описание работы установки

Установка (см. рис. 6.1) работает следующим образом.

В начальный момент времени пружины 11 удерживают ползушки 12 в крайнем переднем положении. При этом заходная часть первого калибра находится в соприкосновении с последней парой формующих валков, что обеспечивает гарантированное попадание профиля в правильный блок.

Коромысло находится в горизонтальном положении, строго по оси прокатки; регистраторы сил и перемещений выставлены на “0”.

При попадании профиля в первый правильный калибр 17, происходит его смещение в положение, соответствующее поводкам профиля, смещение перво-

го калибра регистрируется системой измерения через балку 23. Проходя в правильный блок, профиль под действием ловителей 19 и 20 принудительно попадает во второй правильный калибр 18 и смещает его, вызывая перемещение первого правильного калибра 17 в обратное первоначальное положение. При этом происходит спрямление профиля в калибрах и поворот правильного блока относительно шарниров 9 в положение минимального сопротивления выходу прямолинейного профиля. Смещение центра коромысла 14 фиксируется системой измерения через балку 24.

Силы, действующие при этом в аксиальном и нормальном к профилю направлениях, регистрируются системой при помощи балок 25, 26 и 27. Результаты измерений записываются осциллографом на фотобумагу.

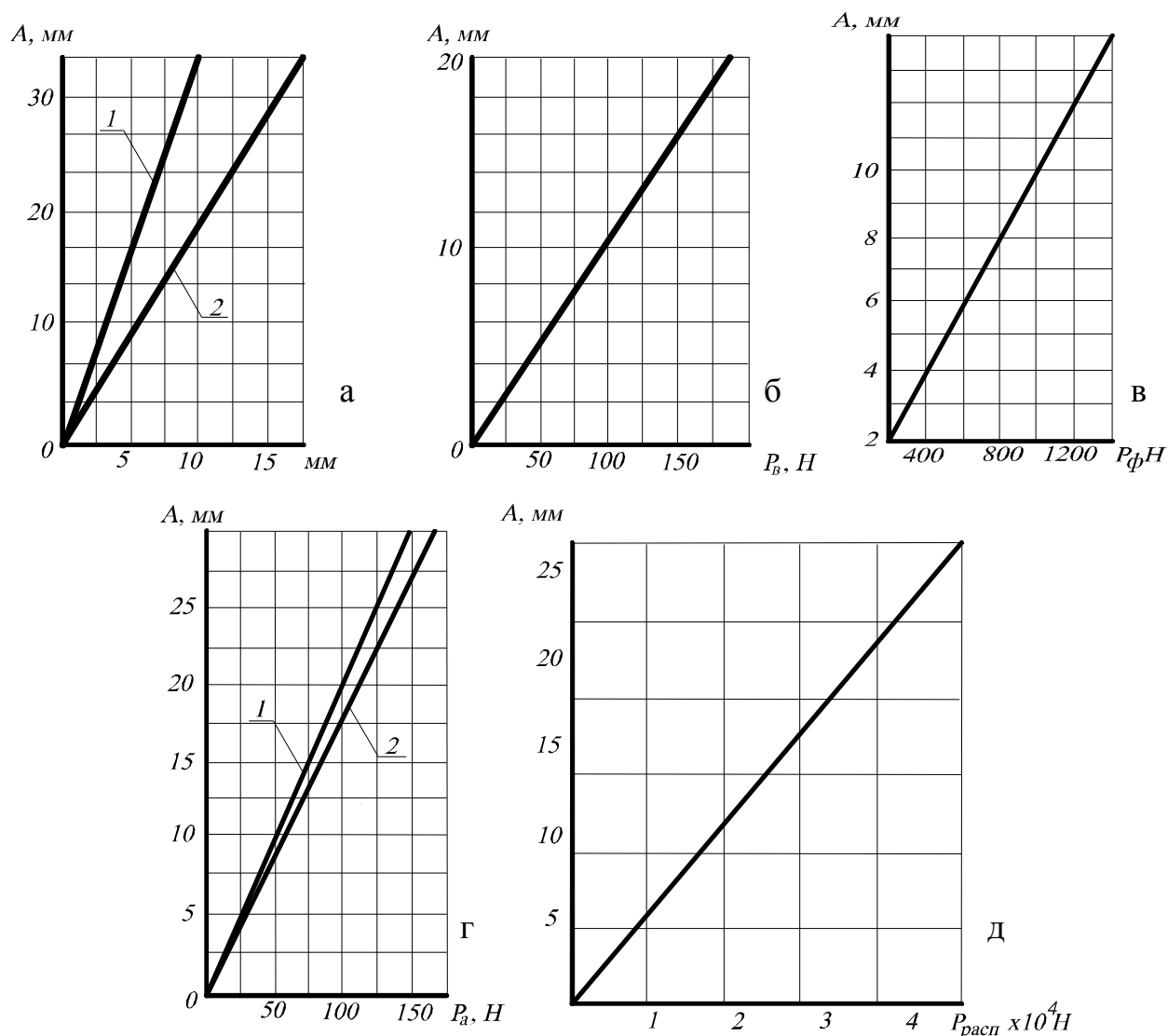


Рис. 6.4. Тарировочные графики измерительных каналов:
а – смещение осей фильеры 1 и центра коромысла 2; б – вертикальная сила; в – изгибающая сила на коромысле; г – горизонтальные силы: левая 1, правая 2; д – распирающая сила в роликах

6.2 Проведение экспериментов и обработка результатов

6.2.1. Исследование разработанной схемы правки

Для проведения анализа разработанной схемы правки были проведены серии экспериментов с использованием станка ГПС-200 и правильной установки, представленной на рис. 6.1 и описанной выше.

Исследования проводили при изготовлении профилей корытообразного сечения (рис. 4.3-3) из материалов Д16Т и Д16М, с шириной развертки 95 и 97 мм. Формообразование проводилось за два перехода.

Для оценки величин поводок предварительно изготавливали профиль без применения правильного блока. По каждому из вариантов опыта результаты приведены в табл. 6.2.

Замеры сил и перемещений правильного блока осуществляли в соответствии с приведенной методикой.

Таблица 6.2

Поводки профилей при исследовании выбранной схемы правки

№ пп	Материал	Ширина развертки В заг, мм	Предварительные поводки (без при- менения правиль- ного устройства), мм/м	Поводки при исполь- зовании правильного устройства, мм/м	№№ осцил- лограмм	Приме- чание
1	Д16М	95	– 75	– 1	1	
2	Д16Т	95	– 50	– 1	2	
3	Д16М	97	– 100	– 2	3	
4	Д16Т	97	– 80	– 1	4	

Диапазон изменения параметров и их амплитудные значения приведены в табл. 6.3 и 6.4 соответственно.

Рассматривая полученные осциллограммы (рис. 6.5 – 6.8), можно выделить следующие стадии процесса правки:

0 – прохождение профиля по формующим клетям, до момента попадания начального участка профиля в первую фильеру правильного блока;

I – прохождение начального участка профиля через правильный блок (две фильеры);

II – прохождение профиля от момента выхода начального участка из правильного блока до момента выхода конечного участка из первой формующей пары роликов;

III – прохождение конечного участка между I и II формующими клетями.

Таблица 6.3

Диапазон изменения кинематических и силовых параметров по осциллограммам процесса правки

Ширина заготовки, мм	Параметры правки	Значение параметров, мм	
		Д16Т	Д16М
95	Δl_1 , – перемещение фильер, мм осц	± 15	± 25
	Δl_2 , – перемещение центра коромысла, мм осц	± 3	± 6
	P_v , – вертикальная сила, мм осц	± 10	± 12
	P_ϕ , – сила на фильерах, мм осц	± 8	± 4
	P_a , – горизонтальная сила, мм осц	± 30	± 18
97	Δl_1 , мм осц	± 24	± 25
	Δl_2 , мм осц	± 9	± 15
	P_v , мм осц	± 45	± 17
	P_ϕ , мм осц	± 12	± 5
	P_a , мм осц	± 50	± 20

Таблица 6.4

Амплитудные значения параметров правки в абсолютных величинах

Шири- на заго- товки	Стадия процесса правки	Параметры									
		Δl_1 , мм		Δl_2 , мм		P_B , Н		P_ϕ , Н		P_a , Н	
		Состояние материала									
		Т	М	Т	М	Т	М	Т	М	Т	М
95 мм	I	3,5	5	1,2	1,9	65	70	400	350	80	70
	II	4,5	6	1,5	2,1	75	100	600	400	120	90
	III	6	8	1,8	2,2	85	90	800	450	160	90
97 мм	I	2,5	3	1,5	2,0	70	80	600	400	120	80
	II	4	5	5	6	100	120	1100	450	220	90
	III	7	8	6	8	130	140	1200	500	240	100

Обозначение
каналов

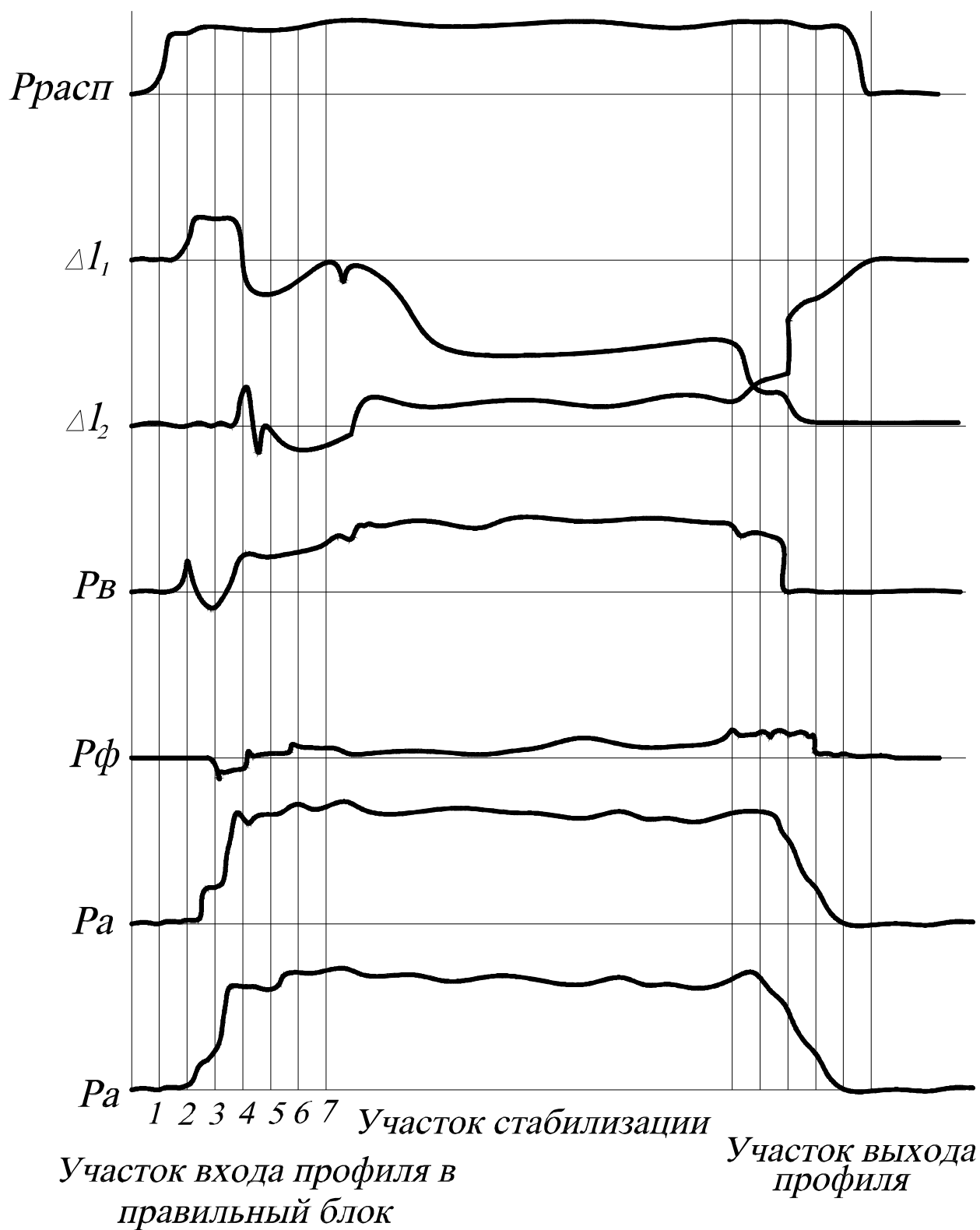


Рис. 6.5. Осциллограмма № 1, заготовка: Д16М, ширина 95 мм

Обозначение
каналов

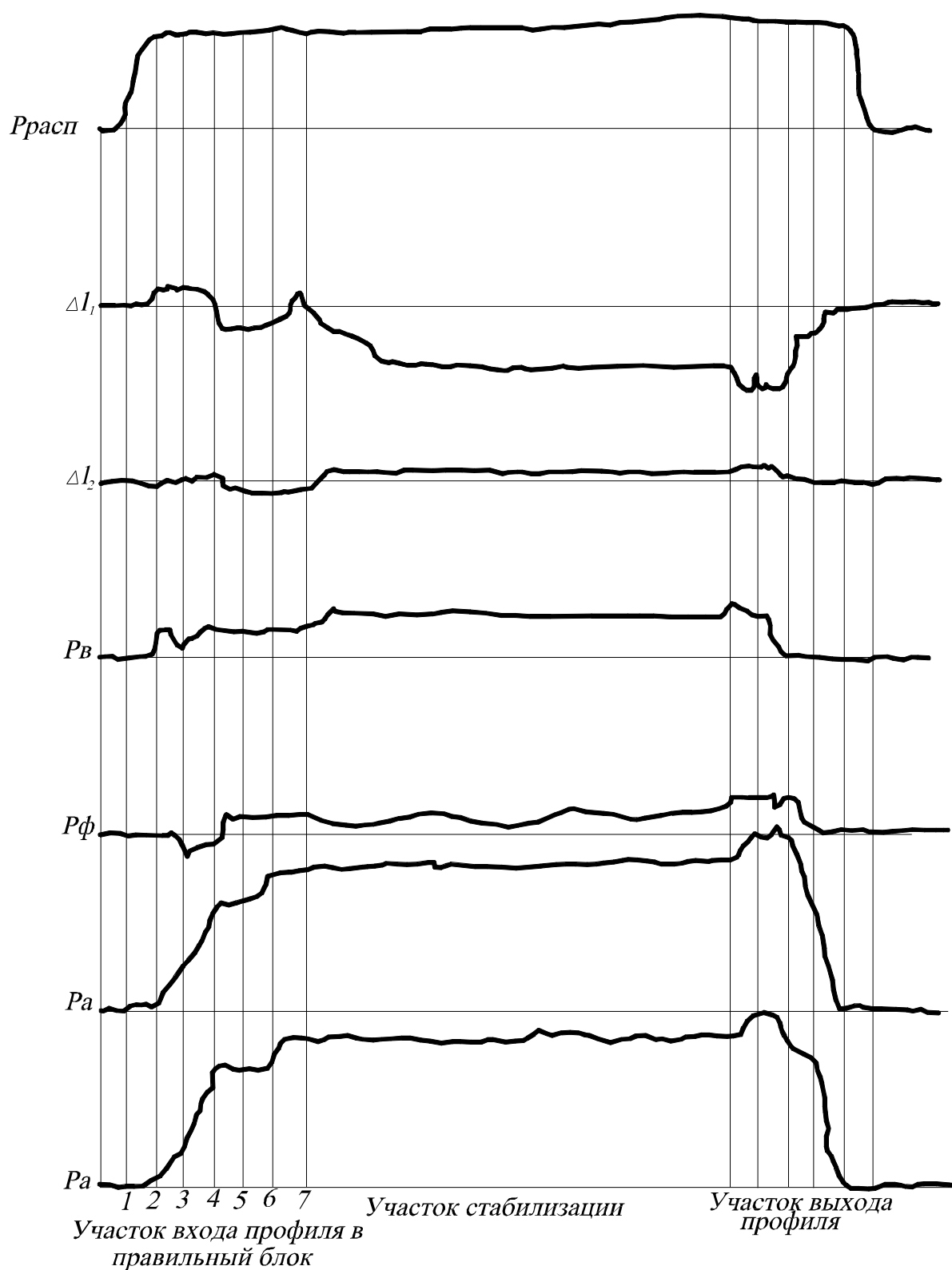


Рис. 6.6. Осциллограмма № 2, заготовка: Д16Т, ширина 95 мм

Обозначение
каналов

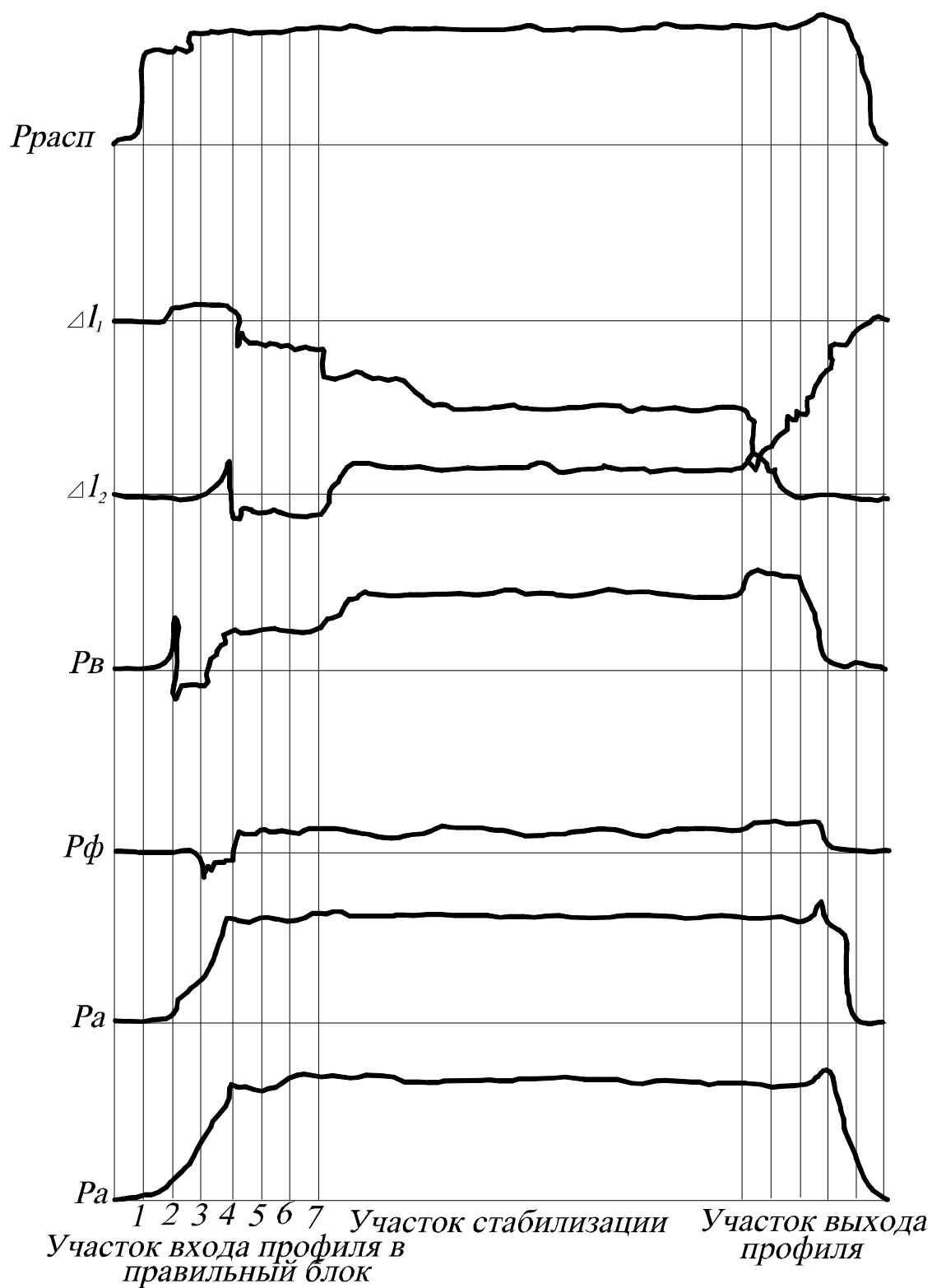


Рис. 6.7. Осциллограмма № 3, заготовка: Д16М, ширина 97мм

Обозначение
каналов

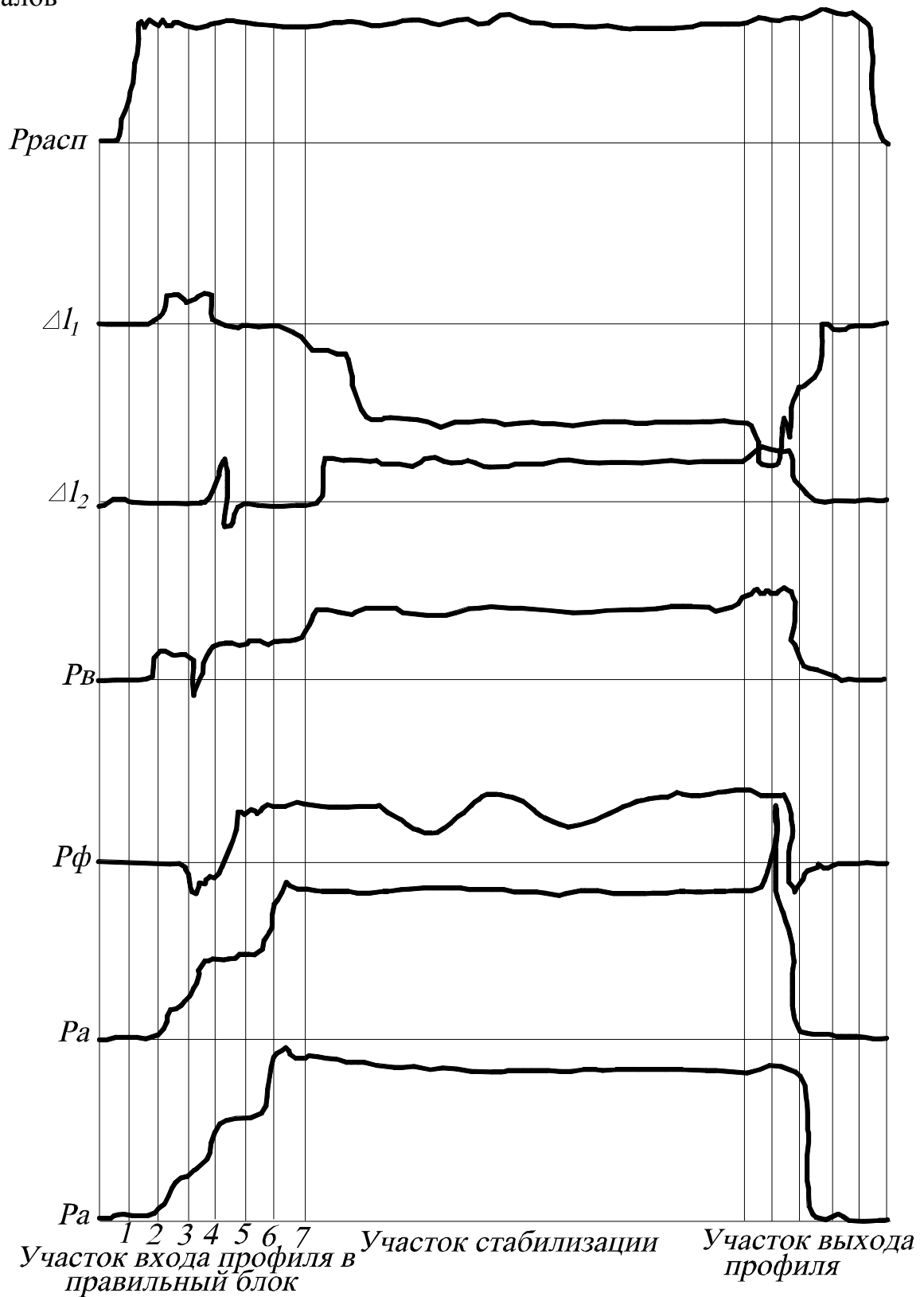


Рис. 6.8. Осциллограмма № 4, заготовка: Д16Т, ширина 97мм

Осциллограммы каналов

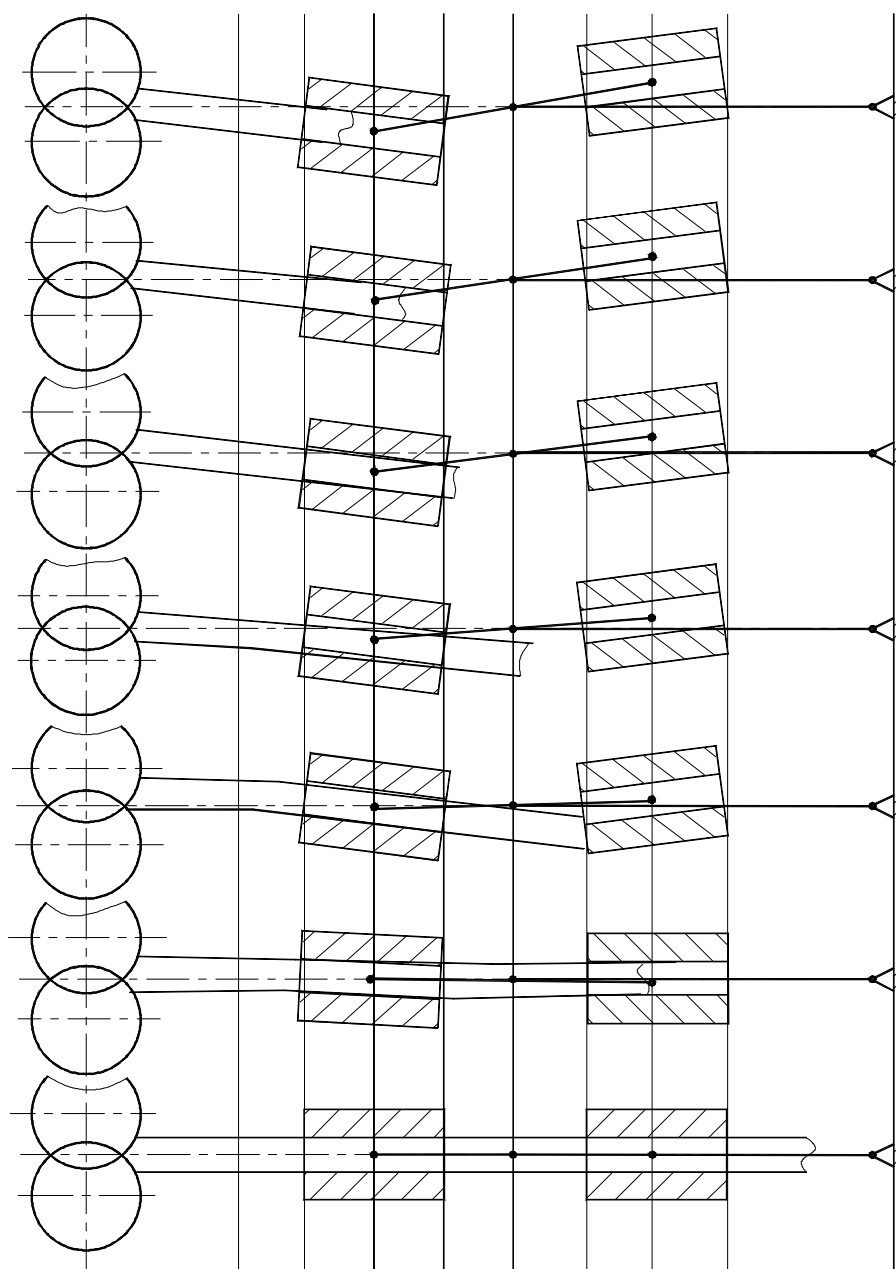
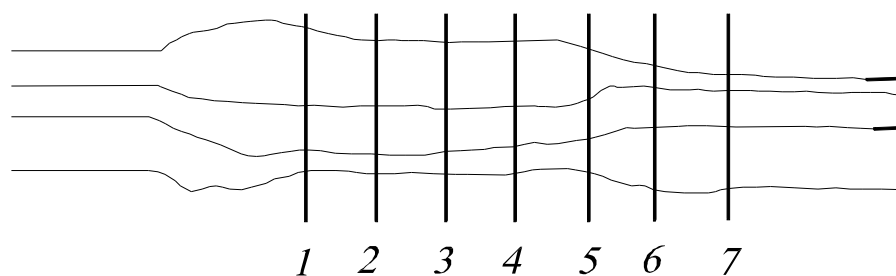


Рис. 6.9. Перемещения правильного блока при заходе в него профиля

Анализируя участки осциллограммы, описывающие первую (I) стадию процесса, т.е. прохождение профиля через правильный блок, можно выделить точки 1 – 7 (рис. 6.9), характеризующие изменения в положении правильного блока. Вхождение начального участка профиля (точка 1) в первую фильеру вызывает ее смещение относительно установленного положения; одновременно отмечается перемещение общей оси фильер и появление "реакции опоры" – вертикальной силы P_v , в то же время на коромысле возникает изгибающий момент $M_{изг}$. Дальнейшее перемещение профиля по первой фильере вызывает еще большее ее смещение до момента прохождения оси закрепления фильеры (точка 2 на рис. 6.9).

Переход начального участка профиля через точку 2 отмечается изменением направления смещения оси фильеры на противоположное первоначальному; одновременно прекращаются смещение общей оси и рост вертикальной силы P_v , а также наблюдается падение изгибающего момента $M_{изг}$ на коромысле.

Выход профиля из первой фильеры характеризуется прекращением смещения фильеры, стабилизацией положения общей оси фильер и силовых параметров P_v и $M_{изг}$, т.е. очевидно, что фильера "сработала", установив профиль в положение, определяемое его поводками и жесткостью, сама заняв строго определенное положение, которое сохраняется до момента входа профиля во вторую фильеру (точки 3 – 5 на рис. 6.9).

Вхождение профиля во вторую фильеру (точка 5 на рис. 6.9) вызывает нарушение установившегося равновесия системы и приводит к смещению ее в том же направлении, что при заходе в первую фильеру. Одновременно, первая фильера смещается за счет коромысла в обратном направлении, происходит падение вертикальной силы и рост изгибающего момента. Переход профиля через ось второй фильеры (точка 6) резко уменьшает скорость смещения осей фильер и скорость изменения силовых параметров, сохраняя при этом их монотонный характер.

При выходе профиля из второй фильеры (точка 7) отмечается стабилизация всех параметров процесса (смещения осей фильер, силы P_v и момента $M_{изг}$). Система "правильный блок – профиль – ролики" приходит в установившееся состояние, характеризующееся постоянством кинематических и силовых параметров и формированием профиля с минимальными поводками. В некоторых случаях на этой стадии отмечается незначительные смещения фильер и колебания изгибающего момента на коромысле, что не приводит к появления поводков профиля. Прогиб для всех случаев не превышает 1 – 3 мм/метр, что соответствует техническим требованиям на поставку профилей.

Заключительная, III стадия процесса наблюдается при прохождении конечного участка профиля между формирующими роликами I и II переходов и характеризуется резким нарушением установившегося равновесия системы. Возникает переходный процесс, связанный с нарушением условий закрепления конечного участка профиля.

По мере выхода профиля из второй пары роликов, при отсутствии второй опоры в первой паре роликов, наблюдается смещение правильного блока и одновременное уменьшение силовых параметров P_b и $M_{изг}$. Изменение условий формообразования приводит к образованию на профиле участка с кривизной, отличной от исходной. Прохождение этого участка через правильный блок вызывает его перемещение и стабилизацию на новом уровне, соответствующем исправлению нового изгиба. Процесс заканчивается вместе с остановкой профиля после выхода из последней пары формирующих валков.

6.2.2. Продольная кривизна профилей и силовые параметры правки

Исследованы характеристики продольной кривизны отформованных профилей. На всех профилях имеются концевые искривленные участки и срединные прямолинейные участки; отклонения от прямолинейности последних не превышают нормированных значений.

Оценивая экспериментальные данные для различных величин ширины развертки заготовки 95 мм и 97 мм, можно выделить однозначное влияние ширины заготовки на величины исследуемых параметров. Увеличение ширины заготовки с 95 до 97 мм приводит к возрастанию силовых параметров: силы P_b – на (20 – 30) %, изгибающего момента $M_{изг}$ – на (70 – 80) %, силы P_a – на 80 %.

Увеличение силы " P_b " обусловлено большим смещением фильер, а увеличение момента $M_{изг}$ и силы P_a – увеличением исходной кривизны профиля и сил трения в фильерах.

Абсолютные максимальные значения перемещения фильер, центра коромысла и силовых характеристик в зависимости от ширины развертки и состояния материала приведены на диаграммах рис. 6.10 – 6.12, табл. 6.3, 6.4.

Возрастание силовых параметров с увеличением ширины развертки можно объяснить тем, что большая ширина создает большее смещение элементов правильного блока вследствие того, что ширина 97 мм является избыточной для данного формирующего калибра, где создается зона с повышенным уровнем сжимающих напряжений (пластический шарнир). Высокая чувствительность зоны пластического шарнира к изменению напряженного состояния под влиянием внешних силовых воздействий при небольших колебаниях фильер при заходе в них профиля вызывает существенные изменения в очаге пластической деформации, приводящие к изменению кривизны профиля.

Меньшая ширина развертки заготовки создает более жесткую схему механического состояния в очаге деформаций, менее чувствительную к изменению напряженного состояния. Это объясняется меньшим торцевым поджатием или же его отсутствием. При малых углах подгибки в последнем переходе пластический шарнир в калибре валков может и не возникать и процесс правки в этом случае трудно реализуем. Такая ситуация часто возникает при назначении последнего перехода в качестве калибрующего. В этом случае правка, совмещенная с формообразованием, не является достаточно эффективной и предотвращение поводов приходится осуществлять путем тщательной выверки схемы формообразования.

Влияние состояния материала (Д16Т и Д16М) на исследуемые параметры правки имеет некоторые особенности. Для более мягкого состояния материала Д16М характерно большее смещение фильер и коромысла, что можно объяснить меньшими прочностными характеристиками материала в очаге деформации, его большей “податливостью” при осадке со стороны роликов. Участок заготовки, находящийся в межклетьевом пространстве, оказывает меньшее влияние на формирование окончательного сечения профиля. При достаточной избыточной ширине заготовки происходит переход к пластическому состоянию и схема напряженно-деформированного состояния в очаге деформации приближается к схеме прессования или выдавливания с несбалансированными условиями обеспечения прямолинейности профиля. В этом случае кривизна профиля из более мягкого материала оказывается больше, чем кривизна профиля того же сечения и той же ширины развертки из более жесткого материала.

Более мягкое состояние материала Д16М, создавая большее смещение фильер из-за большей кривизны выходящего профиля, создает в начальный момент и большее значение реакции опоры силы P_v (на 20 – 30 % по сравнению с использованием в качестве заготовки материала Д16Т).

На последующих этапах увеличение момента силы $M_{изг}$ на коромыслах и горизонтальной силы P_a при прокатке материала Д16Т объясняется большими величинами ответных реакций со стороны правильного блока на прохождение через него более жесткого профиля. Следует отметить, что в фильерах происходит спрямление профиля двояким образом. Ограниченный зазор в каждой из фильер обеспечивает спрямление профиля сосредоточенной центральной силой по схеме балки, опертой по концам. Для одних и тех же параметров профиля спрямляющие силы будут тем больше, чем длиннее фильеры. Указанная трехточечная схема правки несколько отличается от идеальной схемы, которая принимается в расчетных целях в теории упругости. Дело заключается в том, что зоны приложения нагрузок в фильерах не являются достаточно локализованными. Правильнее было бы говорить о распределенной по закону выпуклой кривой нагрузке в ограниченно локализованной зоне профиля. При этом создается значительное трение между профилем и фильерой, необходимое для возникновения жесткой обратной связи. Отметим, что роликовая фильера может обеспечивать процесс правки исключительно за счет поворота сечения пластического шарнира без обеспечения схемы всестороннего сжатия в очаге пластической деформации.

Иной вид спрямления профиля осуществляется за счет ограничения коромысла, несущего правильные фильеры. Здесь схема правки также является трехточечной, однако одна из точек приходится на пластический шарнир, а две других соотносятся с местоположением фильер. Эта схема правки является конфигурационной и определяет только разложение сил правки по плоскостям, что также является достаточно важным для обеспечения требуемых условий в роликовом калибре.

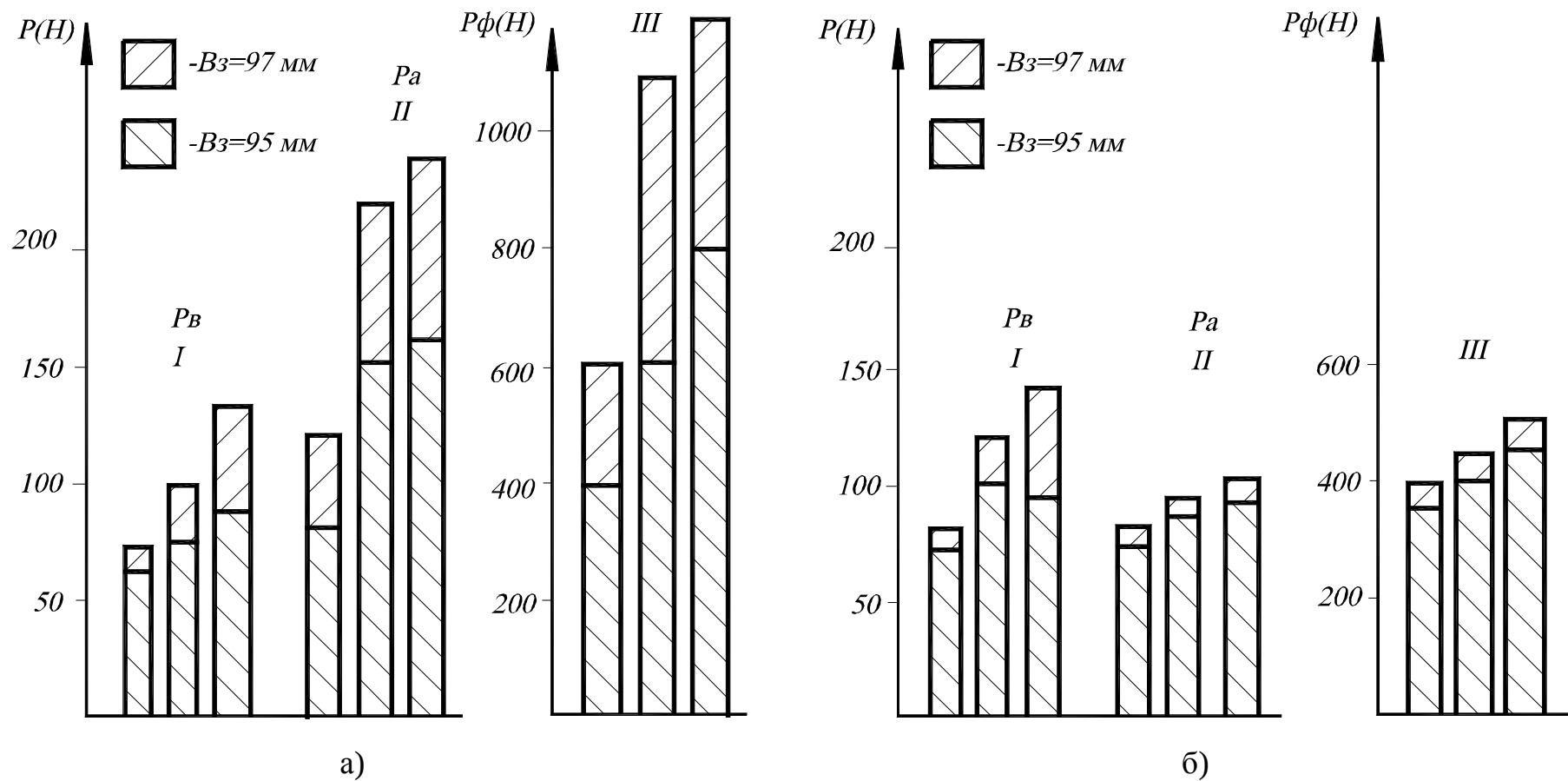


Рис. 6.10. Зависимость силовых параметров правки от ширины заготовки:
а – состояние Т; б – состояние М; I, II, III – стадии процесса

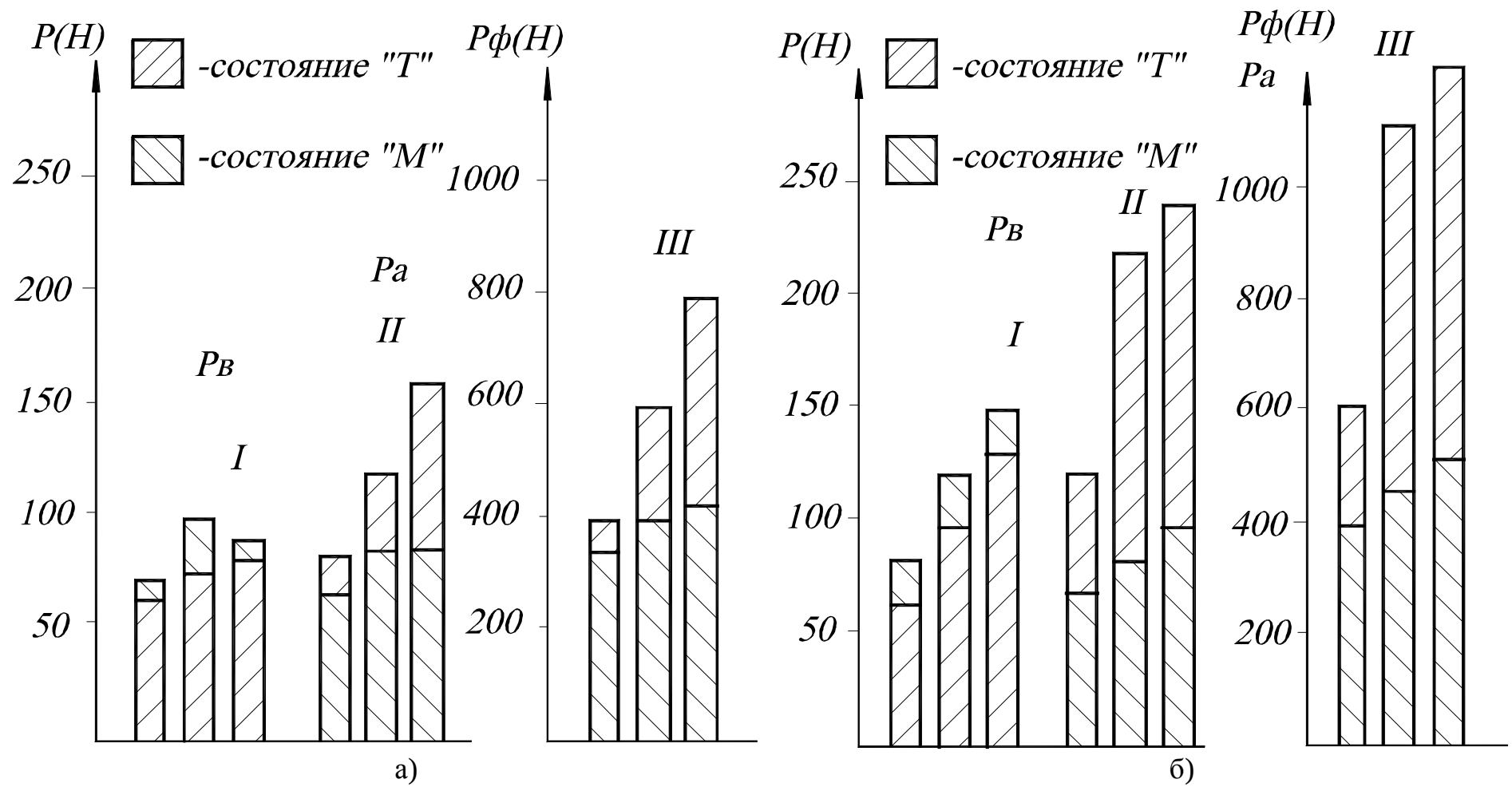


Рис.6.11. Зависимость силовых параметров процесса правки от состояния материала:
 а - для ширины заготовки $B = 95$ мм; б- для ширины заготовки $B = 97$ мм; I , II , III – стадии процесса

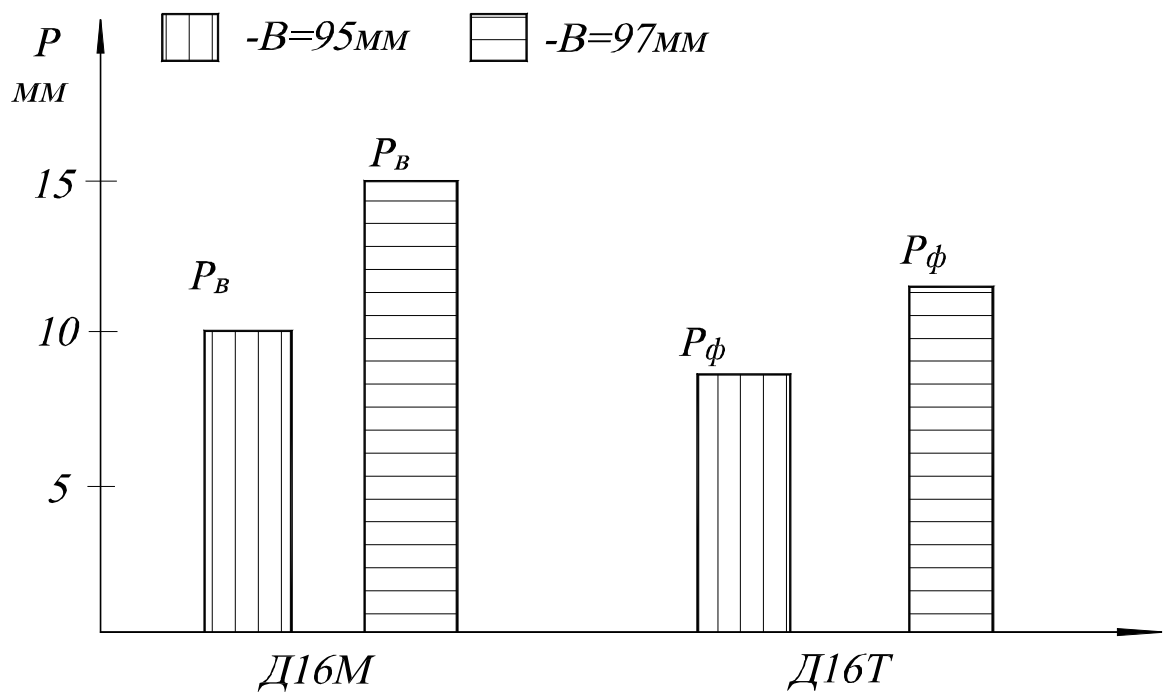
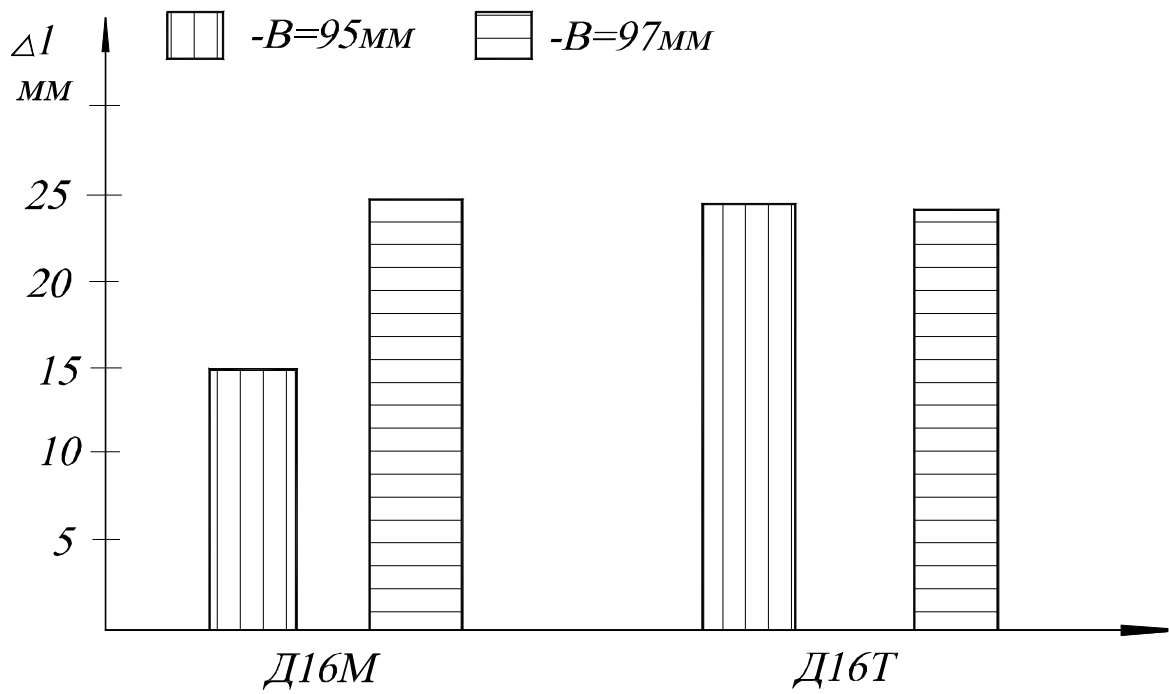


Рис. 6.12. Зависимость параметров правки от ширины развертки заготовки и механических свойств материала (по осциллограммам)

6.2.3. Влияние ширины заготовки на поводки

Проведенными ранее исследованиями [171, 72] определен выбор оптимальной ширины заготовки при стесненном изгибе с точки зрения получения требуемых характеристик поперечного сечения профилей: утолщений по зонам сгиба, внутреннего и наружного радиусов, определения предельных степеней деформации.

Зависимость же между шириной заготовки, ее точностью и получаемыми поводками не была установлена. Получение профилей с максимальными утолщениями зон сгиба при использовании существующих правильных устройств обычно приводит к различным искажениям форм поперечного сечения, значительным поводкам, разрыву и гофрообразованию на стенках и полках профилей. Поэтому необходимо установить практические значения ширины развертки заготовки, при которых профили имели бы не только утолщенную бездефектную зону сгиба, но и минимальные поводки.

В качестве правильного устройства применялось устройство, описанное выше. Правильной оснасткой служили две инструментальные фильеры, установленные в корпусах на резиновых амортизаторах. Исследовались профили, поперечные сечения которых представлены на рис. 4.3.

Предварительно настраивали зазоры в формирующих калибрах, выставляли ось профилирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях с точностью $\pm 0,1$ мм. После чего ось правильного блока совмещалась с осью прокатки станка. Прокатывали профиль и измеряли его поводки, результаты заносили в таблицу.

Перед прокаткой каждого типоразмера профиля с правильным устройством для определения поводок, являющихся следствием выбранной схемы формообразования в роликах, прокатывали два профиля без установки правильного устройства. Результаты для сравнения заносили в табл. 6.5.

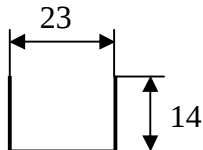
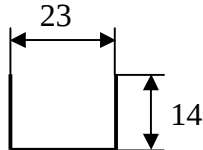
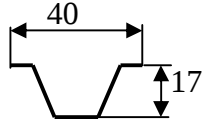
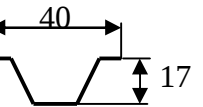
Зависимость поводок профиля от избытка ширины заготовки приведена на графике рис. 6.13.

Анализ результатов данного эксперимента позволяет сделать вывод о том, что при реализации метода стесненного изгиба применение разработанного правильного устройства дает возможность получения профиля с отклонениями от прямолинейности в пределах 1 – 3 мм/м при наличии утолщений зон сгиба до 20 %. Кроме того, в некоторых случаях при попадании профиля в правильный блок предотвращается его разрушение, хотя в отсутствие правильного блока наблюдалось его разрушение вследствие избыточной деформации.

Отклонения размера ширины заготовки в пределах $\pm 0,2$ мм не оказывают существенных влияний на изменения поводок профилей. Установленная точность ширины полос может быть рекомендована для формулировки требований к исходным заготовкам.

Таблица 6.5

Экспериментальные зависимости ширины развертки заготовки и поволоки профилей

№ пп	Типоразмер	Исходный материал	№№ заго- товок	Ширина развертки <u>+0,2мм</u> -0,1мм	Утолщение зон сгиба (средние значения по трем профилям)	Поводки (средние значения по 3-м профилям)					
						Без применения правильного устройства			С применением самонастраи- вающегося правильного устройства		
						Прогиб У, мм/м	Саблеви- дность С, мм/м	Скручи- вание У, мм/м	У, мм/м	С, мм/м	Скрутка У, °/м
	Д16АТ	1-3	48,5	3%	54	12	0	0	0	0	
		4-6	49,5	8%	80	15	0	0	0	0	
		7-9	50,5	15%	115	12	0	2	1		
		10-12	51,5	20%	140	21	0	2	1		
		13-15	52,5	25%	Разрушение профиля			2	2		
		16-18	53,5	28%	Разрушение профиля в роликах стесненного изгиба						
		19-21	48,5	5%	63	10	0	1	0	0	
	Д16АМ	22-24	49,5	10%	95	24	0	1	2	0	
		25-27	50,5	18%	126	29	0	2	1	0	
		28-30	51,5	25%	143	31	0	2	1	0	
		31-33	52,5	32%	180	30	0	5	2	0	
		34-36	53,5	34,0%	244	35	0	3	0	0	
		37-39	61	7%	145	20	2	1	1	2	
	Д16АТ	40-42	62	12%	158	20	2	0	1	2	
		43-45	63	15%	164	18	2	1	2	2	
		46-48	61	9%	148	25	3	1	1	2	
	Д16АМ	49-51	62	14%	165	28	2	2	1	1	
		52-54	63	18%	170	34	3	3	2	0	

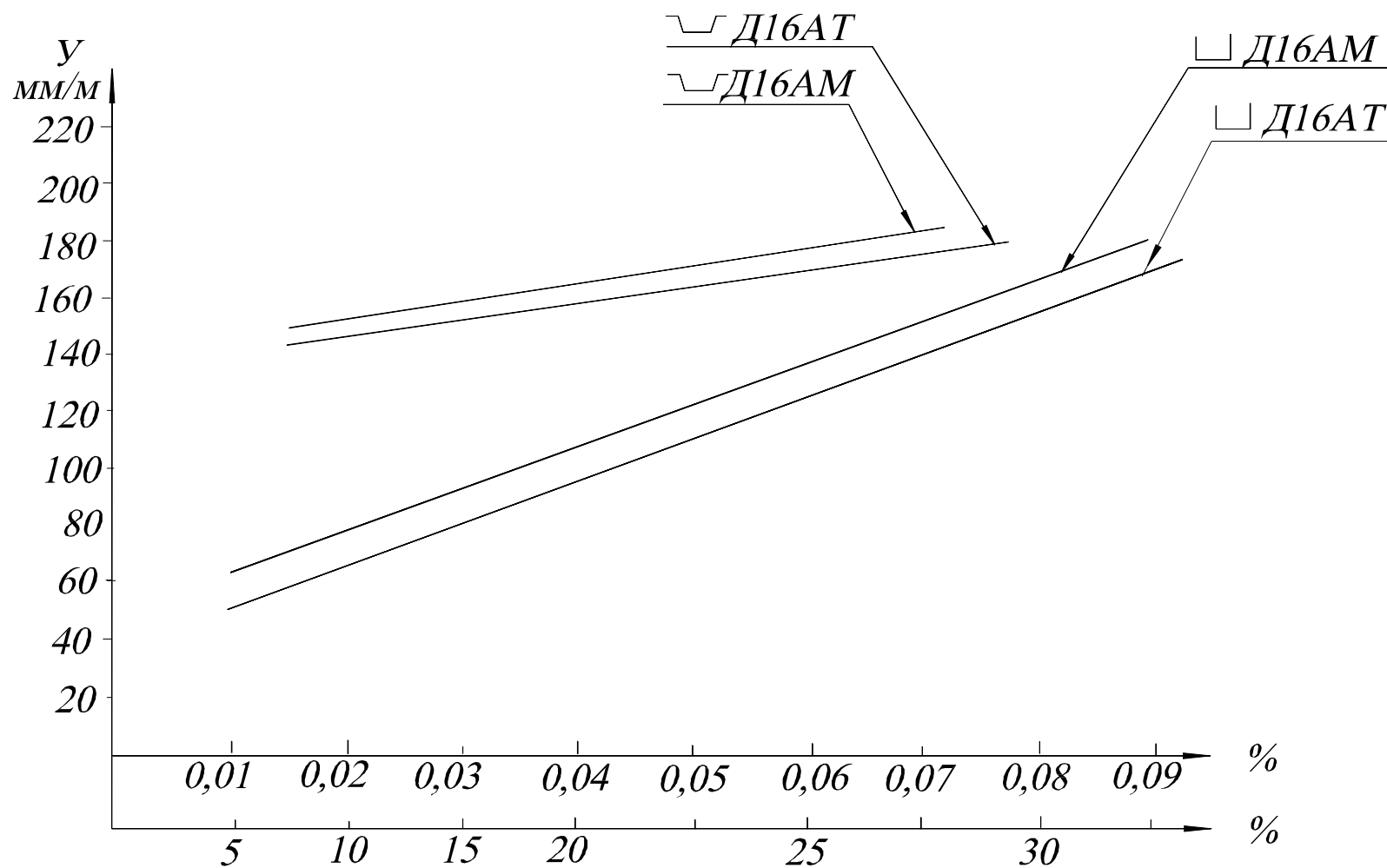


Рис. 6.13. Экспериментальная зависимость поводов профилей от избытка ширины заготовки и утолщения зон сгиба

6.2.4. Определение влияния различных видов правильной оснастки на качество получаемых профилей

В качестве оснащения разработанного устройства для правки возможно применение инструмента двух типов:

- роликов;
- инструментальных фильер (см. рис. 5.9).

Конструктивное исполнение правильной оснастки может быть различным. Из значительного количества опробованных видов правильной оснастки следует рекомендовать правильные роликовые калибры и инструментальные фильеры, типовые конструкции которых представлены на рис. 5.9-а.

Принципиальное отличие этих двух типов правильной оснастки заключается в том, что трение скольжения, присущее инструментальным фильерам, в роликовых калибрах заменено на трение качения.

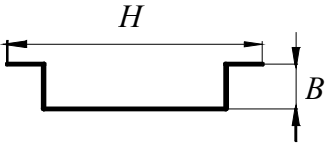
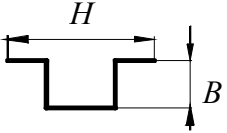
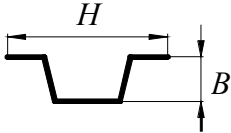
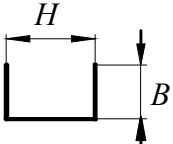
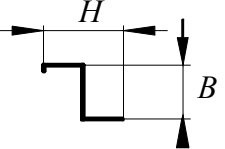
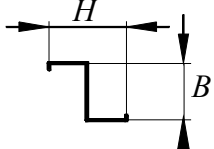
Для обеспечения гарантированного попадания профиля в правильный блок фильеры имеют заходную часть специальной формы, а роликовые калибры выполнены по “зеркальной” схеме, то есть, верхний ролик правильного блока подобен нижнему, формующему, и наоборот (см. рис. 5.9-в). Это позволяет роликовому правильному калибру перед заходом в него профиля охватывать формующие ролики, предотвращая тем самым уход профиля от правильного блока.

Результаты экспериментов, приведенные в табл. 6.6, позволяют сделать вывод о том, что применение этих двух видов оснастки приводит практически к одинаковым результатам. Качество правки достаточно высокое, т.е. данные два вида правильной оснастки являются технически эквивалентными. Выбор для практического применения того или иного типа инструмента может быть обусловлен лишь соображениями конструктивного и экономического характера в каждом конкретном случае.

Вместе с тем, надлежит отметить особенности применения различных видов правильной оснастки. Если роликовая оснастка фактически не создает аксиальной силы в отсутствие обжима профиля, то фильеры, даже при номинальном зазоре, создают аксиальную силу, влияющую на очаг деформации в паре роликов окончательного формообразования. Разумеется, это влияет на условия формирования окончательной формы сечения профиля и на поводки в продольном направлении. Приведенные в данном разделе результаты исследований относятся к случаю достаточно большого зазора в правильных фильерах, когда аксиальная сила практически отсутствует. Более того, зазор в паре роликов окончательного формообразования существенно влияет на схему напряженно-деформированного состояния и в отсутствие правильного устройства определяет продольную кривизну выходящего профиля. Отметим, что регулировка зазора калибра в роликах осуществляется лишь в вертикальном направлении, то есть обжим вертикальных стенок не имеет места. Вопросам влияния зазора на поводки профиля посвящен следующий подраздел книги.

Таблица 6.6

Влияние различных видов правильной оснастки выбранного правильного устройства на прямолинейность профилей

№ пп	Тип профиля	Размер сечения профиля, мм	Вид правильной оснастки. Количество переналадок.		Материал
			4-х роликовый калибр	Инструментальная фильера	
1		BxH=52x20	0	0	Д16Т
2		BxH=54x30	1	1	Д16Т
3		BxH=90x30	0	0	Д16Т
4		BxH=23x14	1	1	Д16М
5		BxH=32x25	1	1	1420Т
6		BxH=32x20	2	1	В95АМ

6.2.5. Исследование влияния зазора в роликовом калибре последнего перехода на поводки профиля

Степень деформации различных участков заготовки существенно зависит от зазора в роликовом калибре, формуящем данные участки. Повышенные требования к точности изготовления роликов окончательного перехода и настройки зазоров в них являются определяющими для получения профилей требуемого качества.

С целью определения необходимой точности настройки зазоров в калибре окончательного перехода при стесненном изгибе были проведены эксперименты на нескольких типоразмерах профилей. Исследования проводились с использованием специальных серег (рис. 6.14) для настройки зазоров между роликами. Серьга представляет собой замкнутый контур, состоящий из двух симметричных щек 1, соединенных между собой планками 2, 3, 6.

Каждая щека имеет неподвижные верхние втулки 4 для установки верхнего ролика и установленные с возможностью перемещения в вертикальной плоскости нижние втулки 5. Втулки 5 жестко установлены в ползушках 7, перемещаемых клиньями 8 при помощи шпилек 9, планки 10, винта 11.

Предварительная настройка ползушек 7 производится при помощи смещения клиньев 8, независимо между собой, затем шпильки 9 фиксируются гайками 12. После сборки серьги перемещение ползушек 7 осуществляется совместно. Для устранения возможных люфтов ползушек 7 служат распорные винты 13 и стопорные винты 14. Замер зазоров между роликами производится при помощи индикаторов часового типа 15, установленных на каждой щеке. Данная серьга позволяет производить настройку зазоров с точностью до 0,01 мм.

Настройка производится следующим образом. Предварительно установленные в серьгу ролики при помощи винта 1, шпилек 9 и клиньев 8 соединяются вплотную между собой. При профилировании индикаторы, установленные на щеках, в случае нарушения жесткости системы покажут величину изменения зазоров в формуящем калибре. Причем, зазор между участками роликов, формующими левую и правую полки профилей, может быть установлен как равномерным, так и с определенным перекосом. Это позволяет определить необходимую степень точности настройки. В процессе эксперимента зазор в калибре настраивался равным толщине исходного материала, меньше и больше его. Устанавливался также различный зазор для левой и правой полок профилей. Правильное устройство не применялось. После прокатки измеряли поводки профилей. Результаты заносили в табл. 6.7.

Анализ результатов экспериментов, устанавливающим влияние зазоров на поводки профиля согласно табл. 6.7, позволяет сформулировать ряд требований к реализации процесса профилирования:

- величина зазоров в калибре окончательного перехода должна устанавливаться с точностью $\pm 0,03$ мм;
- перекос установки роликов более 0,05 мм недопустим;
- зазор калибра окончательного перехода должен устанавливаться таким

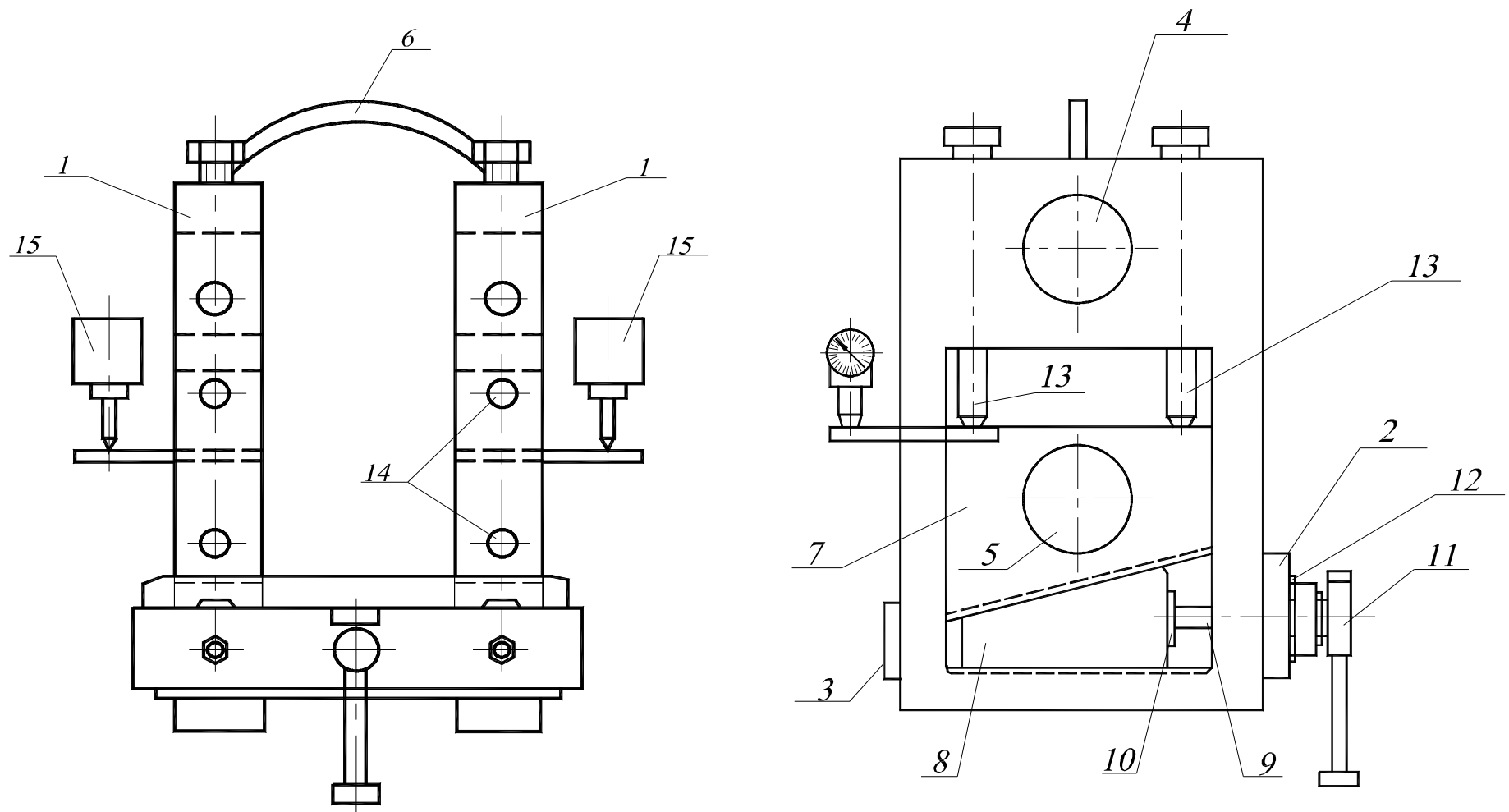


Рис. 6.14. Серьга для настройки и контроля зазоров между верхним и нижним роликами

образом, чтобы при прокатке его величина была равна толщине исходной заготовки (с учетом возможной недостаточной жесткости станка);

- конструкция станка должна обеспечивать необходимую жесткость, а конструкция роликов – точность настройки зазоров и оси прокатки.

Указанный зазор 0,05 мм относится к радиальному зазору, в то время как боковой зазор должен быть в пределах 0,01 мм. Столь жесткие требования обусловлены условиями формообразования: наличие избытка заготовки приводит участки заготовки вблизи осевой плоскости в пластическое состояние. При этом следует учесть схему осадки волнообразной заготовки, которая предваряет развитие пластических деформаций заготовки перед ее входом в роликовый калибр. Прослабленный зазор создает предпосылки для изменения толщины прямолинейных элементов сечения профиля в сторону увеличения, что, с одной стороны, повышает массу профиля (что нежелательно для авиационных конструкций), а с другой стороны не позволяет осуществлять заполнение угловой зоны для формирования утолщения ввиду деформационного упрочнения заготовки в угловой зоне. Уменьшенный зазор также нежелателен, поскольку в этом случае происходит упругий обжим, который в сочетании с осадкой и наличием избытка заготовки приводит к значительным контактным напряжениям между заготовкой и рабочими поверхностями роликов. Для вертикальных полок, особенно в случае недостаточной чистоты обработки поверхности инструмента, возникают весьма неблагоприятные условия формообразования: трение скольжения приводит к потирам и царапинам мягкого плакирующего слоя заготовок авиационных сплавов. При этом на горизонтальных элементах происходит дополнительная раскатка плакирующего слоя. Значительное утонение стенок профиля может приводить к недостаточной несущей способности профиля.

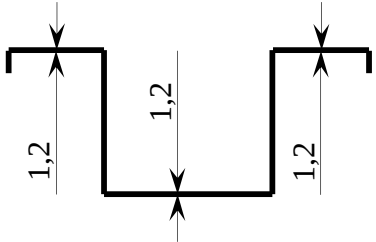
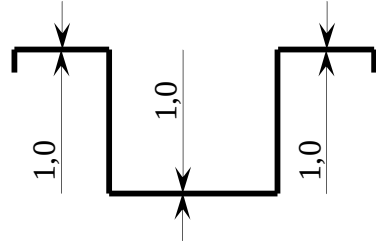
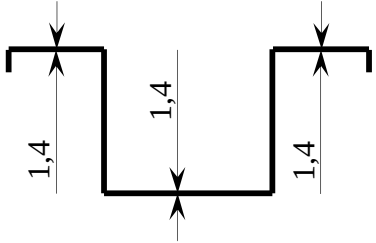
Перекося установки роликов является крайне нежелательным явлением, вызывающим саблевидность и скрутку профиля (см. табл. 6.7). Перекос может возникать как вследствие дефектов изготовления роликов, так и вследствие их настройки. При традиционном профилировании формовка может осуществляться по свободной схеме, а при стесненном изгибе – только в закрытом калибре. Однако здесь многое зависит как от условий замыкания калибров, так и от силовой схемы замыкания рабочих валов.

Во всяком случае, требования, указанные выше, должны строго соблюдаться при проектировании оборудования и технологического оснащения, а также при настройке рабочих режимов процесса формообразования.

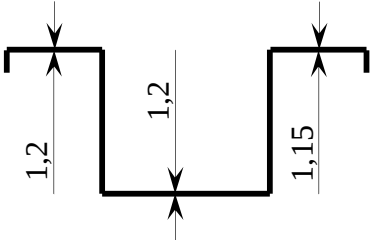
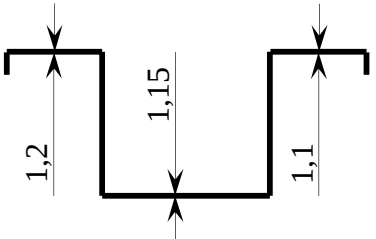
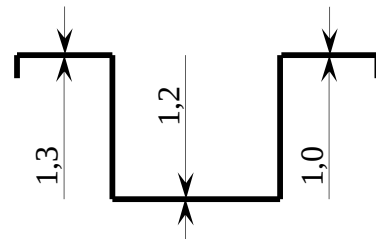
Для обеспечения этих требований было предложено ввести в конструкцию формующих роликов установочные базы – упоры определенного диаметра (рис. 6.15). При установке роликов на станок, конструкция их исключает необходимость настройки, так как упоры верхнего и нижнего роликов соприкасаясь, обеспечивают необходимый зазор между формующими поверхностями. Точность зазора получается достаточной, т.к. определена точностью изготовления роликов, обеспечиваемой по 7÷8 квалитетам. Жесткость станка обеспечивается расчетом при его проектировании.

Таблица 6.7

Влияние величины зазоров в калибре окончательного перехода на поводки профилей

№ пп	Эскиз калибра с зазором - 0,01	Поводки			Примечание	Исходный материал
		Пр У мм/м	Сабл. С мм/м	Скруч. град/м		
1		40	30	60 °/м		Д16АМ 1,2
		25	20	60 °/м		О1420Т 1,2
2		180	240	180 °/м	Раскатка полок	Д16АМ
		190	250	270 °/м	то же	О1420Т
3		25	20	15 °/м	Недоформовка полок	Д16АМ
		20	20	10 °/м	то же	О1420Т

Продолжение табл. 6.7

1	2	3	4	5	6	7
4		40	35,0	90 °/м		Д16АМ
		25	35	90 °/м		О1420Т
5		45	70	130 °/м		Д16АМ
		30	85	140 °/м		О1420
6		50	100	180 °/м		Д16
		40	135	200 °/м		О1420

На рис. 6.15 установочная база П базирует нижний ролик относительно рабочего вала клетки, базы К и О служат для регулировки расположения оси профилирования в горизонтальной плоскости по всем переходам. Поверхность базирования К обычно устанавливается по упорным поверхностям уступов рабочих валов. С целью экономии материала иногда устанавливают дистанционные втулки. Поверхность базирования О обычно замыкается через дистанционную втулку на серьгу, удерживаемую от аксиального смещения винтом. Поверхность базирования Д обеспечивает зазор в вертикальном направлении. Через нее осуществляется и силовое замыкание калибра. Поверхности базирования М и Н служат для обеспечения бокового зазора.

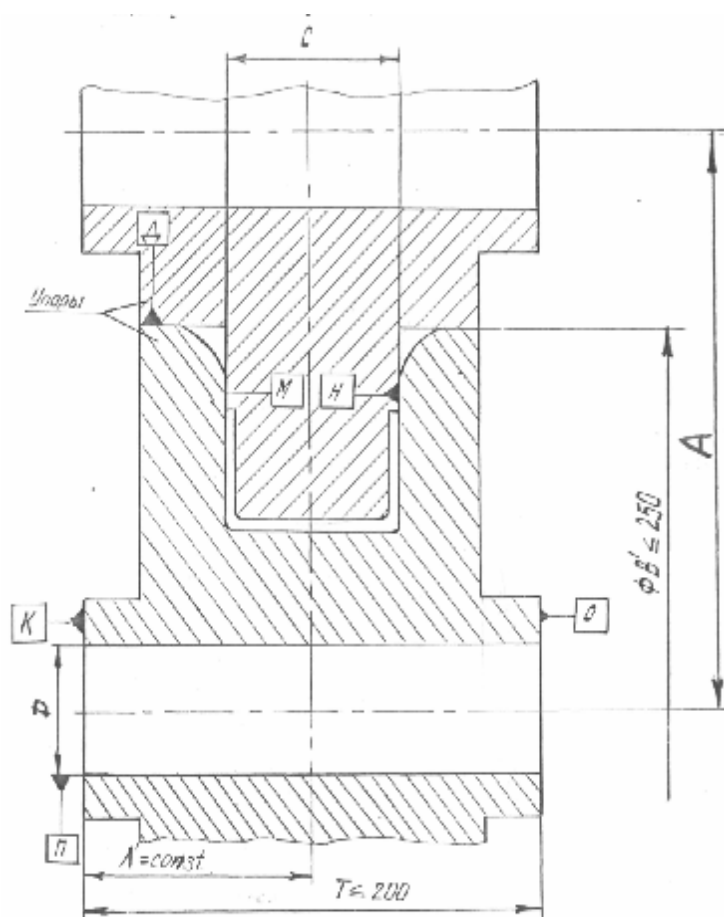


Рис. 6.15. Схема расположения установочных баз формирующих роликов: Д, Л, М, К, П – установочные базы

Межосевое расстояние А обычно выдерживается за счет размеров роликов. При неподвижных нижних валах станка положение оси профилирования в вертикальной плоскости определяется исключительно выбором диаметров рабочих поверхностей формирующих роликов, а в случае регулируемых нижних и верхних валов положение оси профилирования в вертикальной плоскости может быть выбрано путем регулировки положения рабочих валов по высоте. Однако следует иметь в виду, что в том и другом случае имеются и другие ограничения на размерные характеристики роликов. В первую очередь следует при-

нимать во внимание обеспечение надлежащего скоростного режима профилирования, влияющего на условия потери устойчивости заготовки и качество поверхности профиля.

6.2.6. Выбор диаметров формирующих роликов при стесненном изгибе и влияние их величин на поводки

Задача получения прямолинейного профиля связана с рациональным выбором соотношения формирующих диаметров верхнего и нижнего роликов. В работах [38, 50] даны различные рекомендации по определению диаметров роликов, однако они не учитывают особенностей метода стесненного изгиба. Например, предлагается осуществлять врез калибра поровну в верхний и нижний валок [50] или производить расчет диаметров роликов по методу равенства моментов [38], когда линия (на верхнем и нижнем роликах), имеющая одинаковые линейные скорости, располагается по центру тяжести поперечного сечения профиля (калибра); также не дает удовлетворительного результата расчет диаметров роликов по методу равенства окружных скоростей, применяемый при прокатке профилей в металлургии [38].

Нами разработан надежный и достаточно простой вариант выбора диаметров роликов, учитывающей особенности стесненного изгиба.

Повышенное давление со стороны заготовки на формирующие ролики с наименьшим ее скольжением относительно инструмента увеличивает неравномерность линейных скоростей формирующего калибра по высоте профиля, что влияет на его поводки.

Однако скорость перемещения заготовки V постоянна и может быть определена по формуле:

$$V = \frac{A}{2} \cdot \omega ,$$

где A – межосевое расстояние; ω – угловая скорость вращения валков.

Вследствие постоянства скорости перемещения профиля участки заготовки, формируемые разными по величине диаметрами роликов, воздействуют друг на друга и приводят к поводкам. Технология стесненного изгиба построена так, что размеры сечения готового профиля однозначно определяют форму и размеры заготовки предварительного перехода [132], (рис. 6.16) и, соответственно, участки профилированной заготовки, которые подлежат осадке в валках окончательного формообразования. В процессе стесненного изгиба происходит осадка участков 1 и 3 – верхним роликом, а участка 2 – нижним роликом (рис. 6.16).

Из механики известно, что некоторое сечение находится в равновесии в том случае, если сумма приложенных к нему моментов сил относительно главных осей равна нулю. Для приведения суммы моментов сил, действующих на профиль относительно горизонтальной оси к нулю, необходимо, чтобы работа осадки участков 1 и 3 ($A_1 + A_3$) верхним роликом равнялась работе осадки участка 2 (A_2) нижним роликом, т. е. Чтобы $A_1 + A_3 = A_2$. При этом различие ус-

ловий трения, отклонениями настройки зазоров в роликовом калибре и другими факторами, незначительно влияющими на прямолинейность, пренебрегаем. Работа будет пропорциональна диаметрам рабочих поверхностей формирующих роликов. В работе по формовке полок 1 и 3 участвуют соответствующие поверхности верхнего и нижнего роликов. Причем, если диаметр верхнего ролика d_1 , формирующий участки 1 и 3, больше соответствующего диаметра нижнего ролика D_2 , то находящаяся между ними полка профиля будет стремиться к перегибу в сторону меньшего диаметра d_2 за счет того, что площадь контакта заготовки и верхнего ролика больше площади контакта заготовки и нижнего ролика (рис. 6.16). То же самое справедливо и для нижней полки профиля. На основании этого, в первом приближении можно сформулировать условие прямолинейности корытообразного профиля (рис. 6.16.) при его формовке прокаткой в следующем виде [5]:

$$\frac{l_1 d_1}{2} = \frac{l_2 d_2}{1}.$$

Условие равенства работ можно сформулировать в следующем виде:

$$s_T \cdot l_2 \cdot d_2 \cdot (d_2 + 2H) = 2 \cdot s_T \cdot l_1 \cdot d_1 \cdot (d_1 + 2H),$$

где σ_T – предел текучести материала; H – высота профиля.

При этом $D_1 = d_1 + 2H$, $D_2 = d_2 + 2H$. Из технологических и конструктивных соображений следует, что левую часть в уравнении равенства работ можно считать константой (с учетом деления на величину предела текучести):

$$l_2 \cdot d_2 \cdot (d_2 + 2H) = C,$$

где C – константа.

Принимая во внимание последнее соотношение, уравнение для равенства работ сводится к следующему квадратному уравнению:

$$l_1 \cdot d_1^2 + 2 \cdot l_1 \cdot H \cdot d_1 - \frac{C}{2} = 0.$$

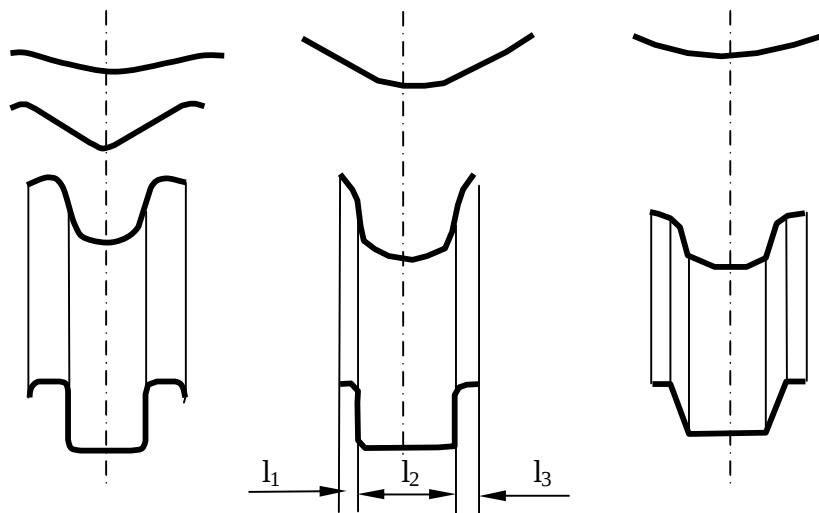


Рис. 6.16. Размеры и формы переходов при стесненном изгибе

Положительный (действительный) корень квадратного уравнения дает значение формирующего диаметра, при котором будет выполняться условие прямолинейности формовки прокаткой корытообразного профиля методом стесненного изгиба. Например, для профиля, с сечением, представленным на рис. 6.17; при заданном значении диаметра $d_2 = 80$ мм, искомый диаметр d_1 составит 73,18 мм.

Предполагаемая закономерность была проверена на нескольких комплектах формирующих роликов. В качестве технологического оборудования использовали гибочно-прокатный станок ГПС – 350, имеющий две пары формирующих роликов. Изготавливаемые из листовых материалов Д16АТ и О1420Т толщиной 1,2 мм профили имели конфигурации, показанные на рис. 6.16.

Формовку профилей осуществляли за 2 – 4 перехода, причем, последовательно были выполнены предварительные переходы, затем отдельно, в окончательном переходе применяли стесненный изгиб.

Результаты экспериментов по формовке профиля, представленного на рис. 6.17, приведены в табл. 6.8. Здесь же показана схема формовки в окончательном переходе.

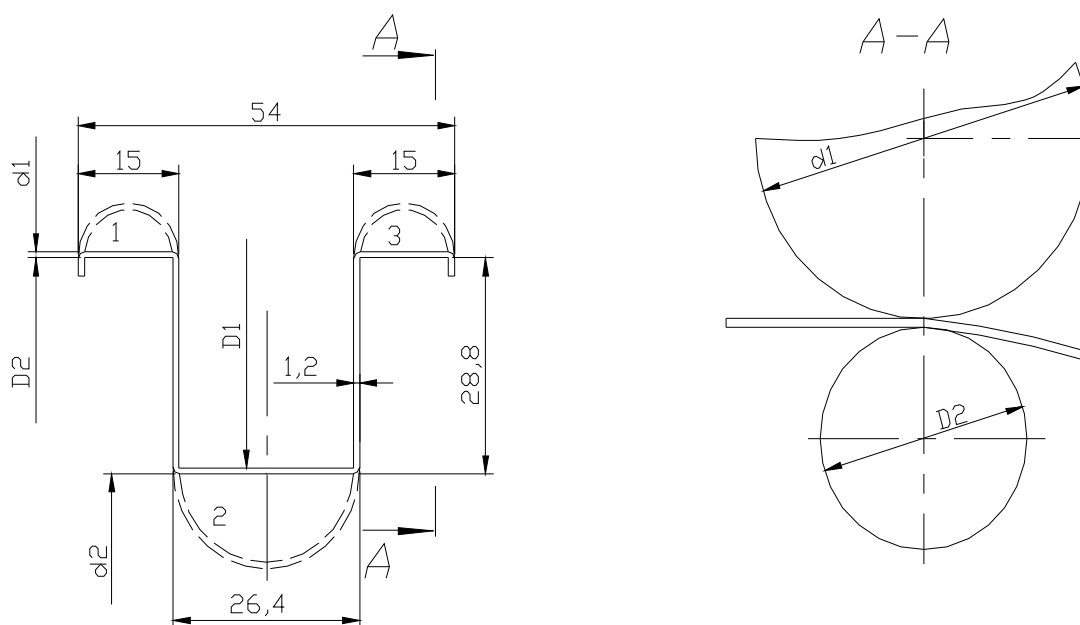


Рис. 6.17. Осадка заготовки в профиль окончательной формы

Поводки профилей после предварительных переходов были незначительными (не превышали 10 – 15 мм/м) и решающего влияния на окончательную прямолинейность не оказали.

Рекомендуем, при определении диаметров роликов для формообразования корытообразных профилей методом стесненного изгиба, использовать вышеизложенные рекомендации.

Таблица 6.8

Результаты эксперимента по формовке профиля 54x28,8x1,2 мм

№№ пп	Соотношение формую- щих диаметров $d_1:d_2$		Предполагаемый прогиб (расчетный)	Фактический про- гиб		Примечание
	расчетный	эксперим.		Д16Т	01420Т	
1	$\frac{73,8}{80,0}$	$\frac{73,8}{73,8}$	– мм	–7	–8	Знак расчет- ного прогиба совпадает с эксперимен- тальным во всех случаях
2				–15	–12	
3				–12	–7	
4				–14	–5	
5				–15	–10	
1	$\frac{85,0}{100}$	$\frac{85,0}{76,7}$	– мм	–15	–12	То же
2				–18	–14	
3				–15	–13	
4				–20	–11	
5				–21	–12	
1	$\frac{74,3}{82,4}$	$\frac{74,3}{80,0}$	— 0 мм	–1	+2	Наблюдаются незначи- тельные от- клонения
2				–2	–2	
3				+2	–1	
4				+1	+2	
5				0	+2	
1	$\frac{74,3}{80,4}$	$\frac{74,3}{96,0}$	+	+12	+8	Знак расчет- ного прогиба совпадает с эксперимен- тальным во всех случаях
2				+22	+12	
3				+17	+7	
4				+18	+6	
5				+10	+5	

6.3. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов

Теоретические исследования и полученные после расчета на ЭВМ данные позволили построить общую модель процесса и найти соответствующие зависимости:

- аксиальной силы от пластических свойств материала, величины исходного прогиба профиля, ширины развертка заготовки, величины зазора в фильерах;
- возвращающей силы от высоты профиля, расстояния между центрами фильер, величины исходного прогиба профиля, ширины развертки заготовки;
- прогиба профиля от ширины развертки заготовки, диаметров роликов, пластических свойств материала.

Величины этих параметров были рассчитаны при заданных величинах прогиба профиля и условиях его полного спрямления. Замеры экспериментальных данных производились с помощью описанной выше экспериментальной установки в условиях входа профиля в правильное устройство, дальнейшего стабилизированного режима и выхода профиля из последней пары формообразующих валков гибочно-прокатного станка. Эксперименты проводились с исполь-

зованием профилей, поперечные сечения которых представлены на рис. 4.3. Материалы заготовок профилей: Д16М, Д16Т, В95М, 1420Т, 1420С. Для сопоставления экспериментальных данных с результатами теоретических исследований построены графические зависимости рис. 6.18 – 6.27, где пунктирными линиями обозначены результаты теоретических исследований, сплошными – экспериментальные данные. Замеры сил и перемещений вели параллельно с исследованием влияния на поводки профилей ширины исходной заготовки и зазоров в калибре окончательного перехода. Расчетные данные, в соответствии с формулой (4.62) для определения P_v и номограммой рис. 4.17, отличаются от экспериментальных (рис. 6.23 – 6.25) в пределах 20%. Отличие величины P_a от теоретически рассчитанной составляет максимум 18% (см. рис. 6.19 – 6.21). Исключение составляет зависимость горизонтальной силы от ширины развертки заготовки (рис. 6.22), поскольку в данном случае брали плюсовой зазор из условия создания благоприятных условий захода искривленного профиля в фильеры.

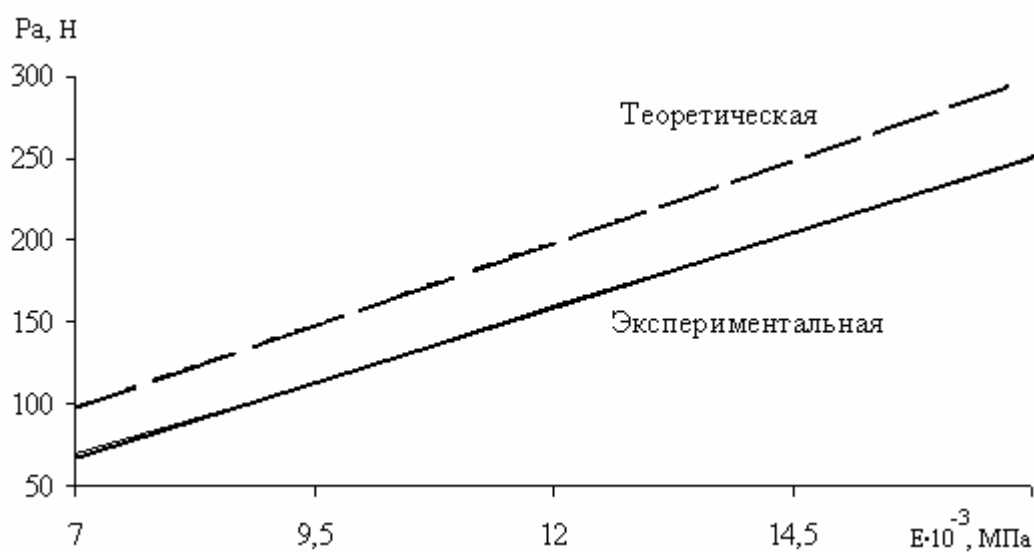


Рис. 6.18. Зависимость горизонтальной силы от модуля Юнга

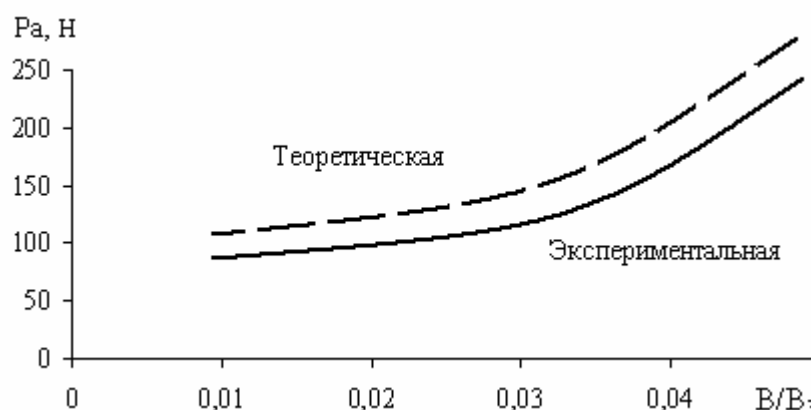


Рис. 6.19. Зависимость горизонтальной силы от ширины развертки заготовки

Полученные расчетным путем величины прогиба профилей отличаются от экспериментальных данных в пределах 5 – 15% (рис. 6.26, 6.27).

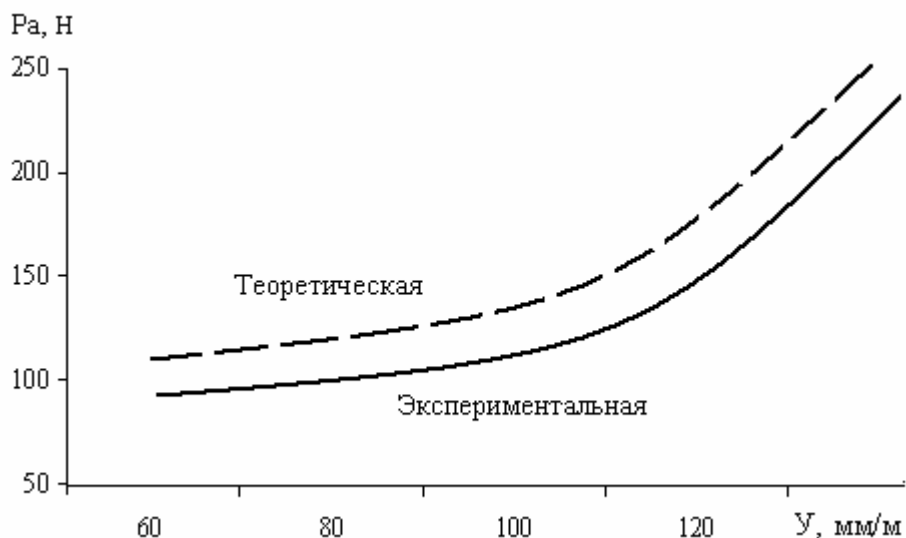


Рис. 6.20. Зависимость горизонтальной силы от прогиба профиля

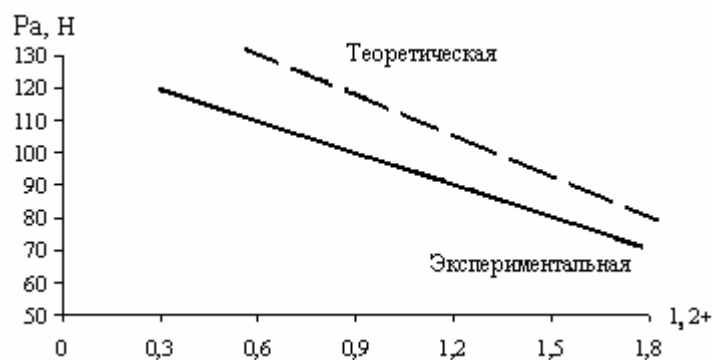


Рис. 6.21. Зависимость горизонтальной силы от величины зазора в фильере

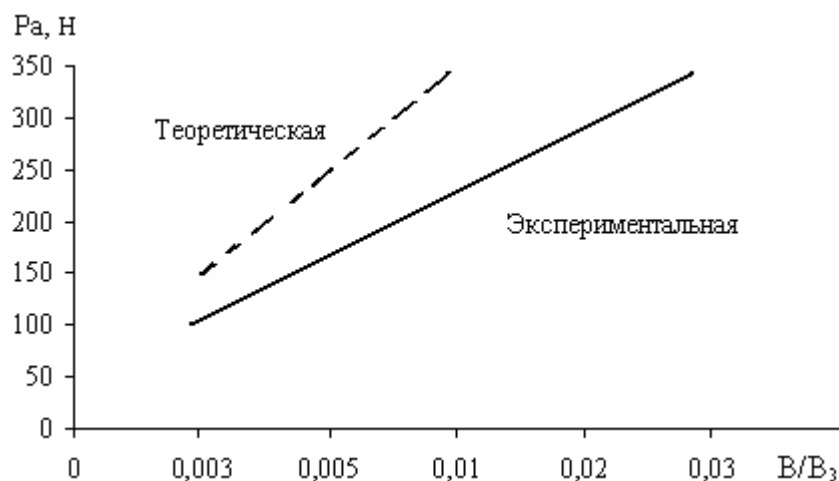


Рис. 6.22. Зависимость горизонтальной силы от ширины развертки заготовки

Экспериментальные данные по замерам P_a в несколько большей степени совпадают с расчетными по своим максимальным значениям, что соответствует заключительной и стационарной стадии процесса правки. Таким образом, полученные расчетные зависимости для определения прогиба профиля и действующей

щих в правильном блоке сил P_a , достаточно достоверны и отличаются от данных, полученных экспериментально, в пределах 20%.

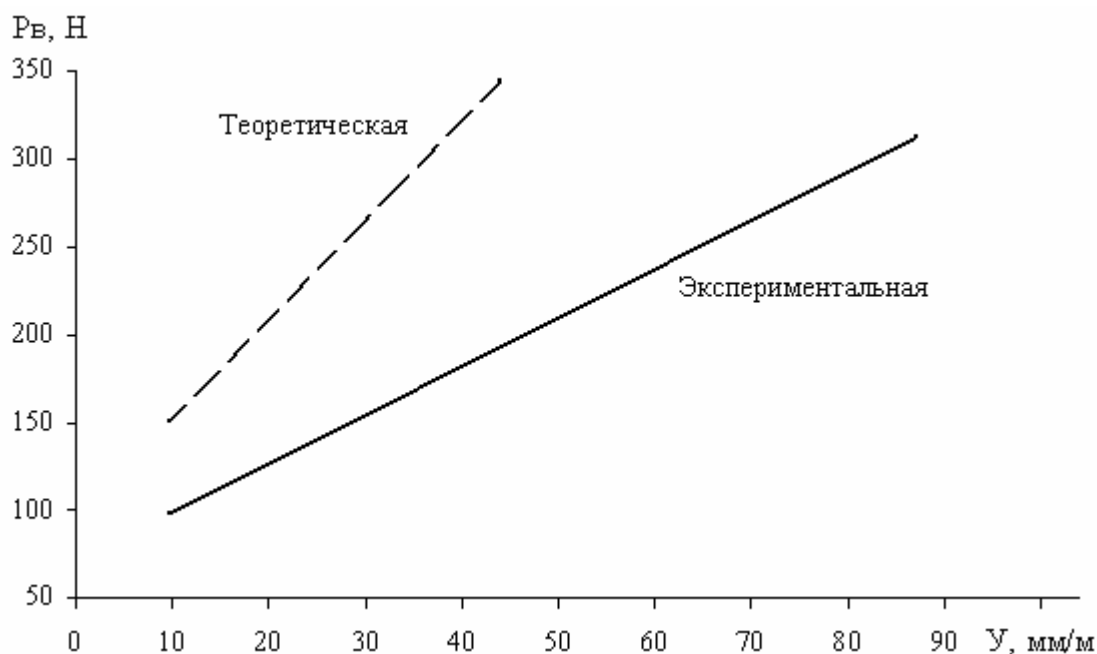


Рис. 6.23. Зависимость горизонтальной силы от прогиба профиля

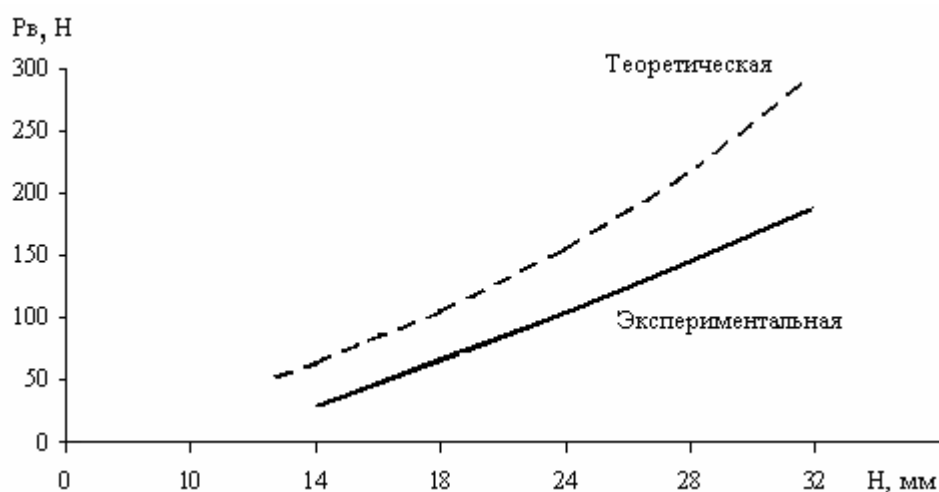


Рис. 6.24. Зависимость вертикальной силы от высоты профиля

Что касается зависимости вертикальной силы P_b от величины прогиба (рис. 6.23), то здесь наблюдается существенное расхождение между теорией и экспериментом, что объясняется применением при теоретическом расчете разложения действующей силы с учетом поправки на угол, вызванный спрямлением профиля в фильере. Однако этот показатель очень чувствителен к величине зазора в фильере, а в экспериментах зазор был увеличен с превышением толщины заготовки, как уже указывалось, для предотвращения заклинивания профиля. Некоторое расхождение кривых на рис. 6.25 связано с конструктивным

ограничением поворота фильеры, когда при малых расстояниях между фильерами включается эффект спрямления профиля по четырехточечной схеме.

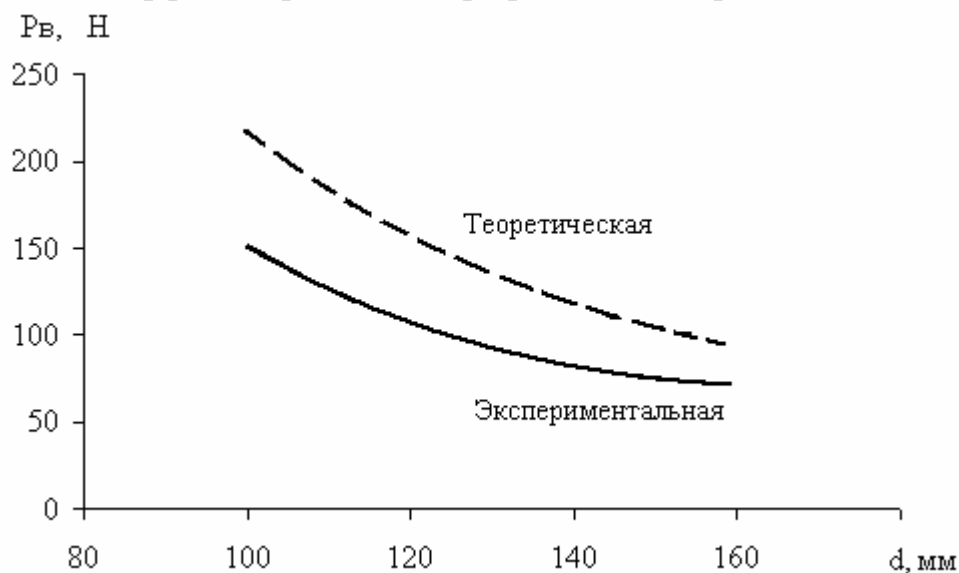


Рис. 6.25. Зависимость вертикальной силы от расстояния между фильерами

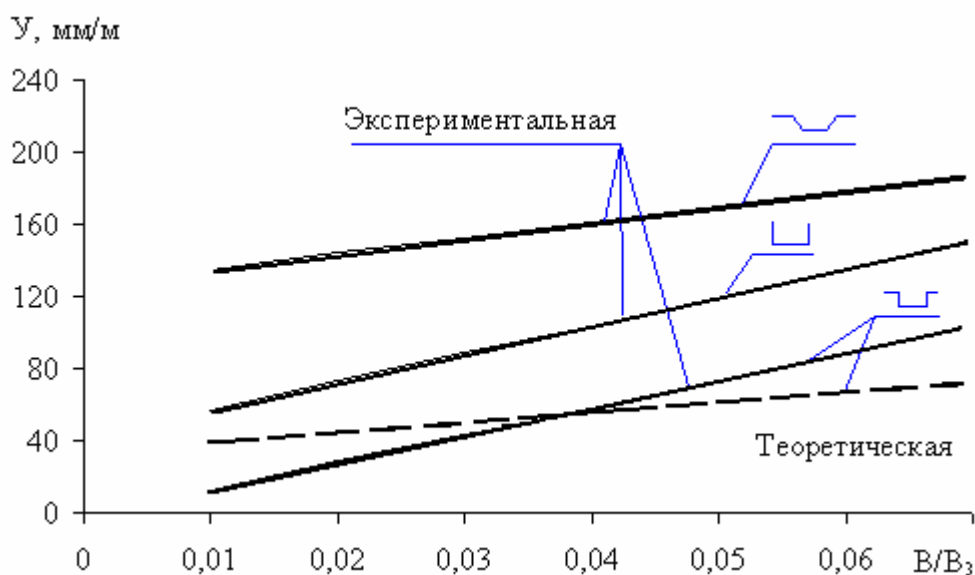


Рис. 6.26. Зависимость прогиба профиля от ширины развертки заготовки

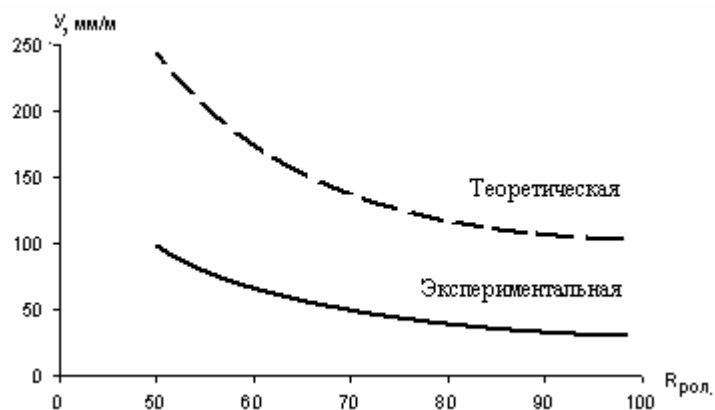


Рис. 6.27. Зависимость прогиба профиля от радиуса роликов

Весьма важными зависимостями представляются зависимости продольного прогиба от ширины развертки заготовки и радиусов формирующих роликов. Отметим, что на рис. 6.22 и 6.26 величина B представляет собой величину избытка ширины заготовки. Рис. 6.26 дает хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных для корытообразного профиля небольшой высоты. С увеличением глубины формовки продольный прогиб увеличивается. При этом значительное влияние может оказывать несбалансированность по силам и моментам процессов осадки донной части профиля и горизонтальных полок. Здесь значение имеет не только ширина соответствующих элементов профиля, но и выбранная схема формовки (радиус кривизны участка профиля, сформованного на предварительных переходах под последующую осадку в паре роликов окончательного формообразования).

Расчетная и экспериментальная зависимости прогиба профиля от радиуса формирующих роликов различаются существенно (см. рис. 6.27). Вероятнее всего, это расхождение происходит из-за отличия схемы НДС, принятой для теоретического расчета, и реальной схемы НДС участков заготовки, подверженных осадке. При теоретическом расчете принята схема плоского напряженного состояния, в то время как в реальности заготовка испытывает объемное напряженное состояние (в зависимости от конфигурации сечения и выбранной схемы формообразования с растягивающими или сжимающими напряжениями в продольном направлении).

Выводы по разделу 6

1. Разработана, изготовлена, отлажена и использована при экспериментальных исследованиях специализированная установка, обеспечивающая замеры и запись осциллограммы перемещения и сил, возникающих на элементах правильного блока в процессе предупреждения поводок профилей.

2. Тензометрирование параметров процесса позволило раскрыть схему работы устройства, величины перемещений элементов правильного блока и создающихся в них сил при самонастраивании системы.

3. Анализ осциллограмм процесса правки и исследование продольной геометрии получаемых профилей показали, что рассматриваемая система «правильный блок – профиль – ролики», благодаря наличию в ней обратной связи посредством профиля, обладает способностью к самонастраиванию системы для получения профиля с минимальными поводками.

4. Выявлен трехстадийный характер процесса, обусловленный протеканием неуравновешенных периодов входа и выхода концевых участков профиля из правильного блока и стадии стабилизации процессов, наблюдаемой на всем этапе одновременного прохождения профиля через формирующие калибры и правильный блок.

5. Установлены теоретические и экспериментальные зависимости между шириной развертки, прочностными свойствами материала и поводками профиля, силами, действующими в правильном блоке, между основными технологи-

ческими параметрами профилирования. Сходность результатов теоретических и экспериментальных исследований удовлетворительная. Теоретические зависимости могут быть рекомендованы для отдельных расчетов параметров технологического процесса.

6. Наибольшие значения всех силовых параметров отмечаются на заключительной стадии процесса правки. Они на 15 – 20% превосходят таковые на стационарной стадии, наименьшие значения наблюдаются на начальной стадии.

7. Исследование продольной геометрии получаемых профилей позволяет заключить, что рассматриваемый правильный блок обеспечивает прямолинейность исследуемой группы профилей в пределах 1...3 мм/м на стационарной стадии процесса правки.

8. С увеличением ширины развертки заготовки наблюдается рост поводок по линейному закону для всех рассматриваемых конфигураций профилей и их материалов. С превышением ширины развертки заготовки над разверткой формующего калибра более 3%, происходит замедление и остановка роста величины утолщения зон сгиба, однако, величины поводок продолжает значительно расти.

9. Исследования применения различной правильной оснастки показывают возможность применения в качестве оснащения выбранного правильного блока как инструментальные фильеры, так и роликовые калибры по разработанным схемам.

10. Определена необходимая точность ширины развертки исходной заготовки в пределах $(+0,2/-0,1)$ мм, точность настройки зазоров в формующем калибре в пределах $\pm 0,03$ мм и оси профилирования в пределах $\pm 0,5$ мм. Разработаны, опробованы и исследованы способы, схемы и конструкция оснастки, обеспечивающие требуемую точность параметров настройки формующей и правильной оснастки.

11. Предложен способ определения диаметров формующих роликов при стесненном изгибе с точки зрения получения прямого профиля. Экспериментальные исследования на нескольких типоразмерах оснастки подтвердили возможность использования принятой процедуры расчета для практических целей.

12. Полученные результаты дают возможность разработать технологический процесс получения длинномерных профилей со специфической конфигурацией зон сгиба и обеспечением прямолинейности их при формообразовании.

7. РАЗРАБОКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ СТЕСНЕННЫМ ИЗГИБОМ

Минимальное число переходов, используемое при формообразовании профиля, является одним из основных показателей рациональности выбранного метода его изготовления. В данном разделе рассмотрены наиболее важные вопросы разработки технологий интенсивного формообразования на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований в приложении к потребностям промышленных предприятий РФ. Технология ориентирована на станки семейства ГПС разработки ОАО «Ульяновский НИАТ», производимых серийно в ОАО «Ульяновский механический завод» [172 – 174].

7.1. Этапы проектирования технологического процесса формообразования профилей в роликах

Проектирование технологии производства профилей на основе метода стесненного изгиба осуществляется обычно поэтапно, в следующей последовательности: 1. Проработка чертежа профиля на технологичность; 2. Назначение геометрических параметров зоны сгиба; 3. Расчет ширины исходной заготовки; 4. Определение энергосиловых параметров процесса; 5. Выбор оборудования; 6. Выбор расположения профиля по отношению к осям основных валков; 7. Выбор основной оси профиля; 8. Выбор схемы и режимов формообразования; 9. Расчет числа переходов; 10. Определение конфигураций переходов; 11. Проектирование инструмента; 12. Оформление конструкторской и технологической документации.

Отметим, что время от времени предпринимаются более или менее удачные попытки разработки технологии производства профилей по схемам традиционного профилирования без серьезной научной поддержки. Обычно идут следующим путем. При проработке на технологичность чертежа профиля руководствуются общими требованиями технологичности [175], 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 или исходя из наиболее общих рекомендаций, приведенных в специальной литературе. Опыт разработчика определяется выбор и других параметров: расположение профиля в валках, форма и положение основной оси профиля, углов подгибки и т.д. Окончательный переход формообразования составляется по чертежу профиля, с учетом пружинения [28]. Описанный процесс проектирования технологии не является оптимальным, часто приводит к ошибкам, устраняемым при отработке технологии, а зачастую оказывается и вовсе неудачным.

Для стесненного изгиба характерна процедура [132], приведенная на рис. 7.1.



Рис. 7.1. Процедура разработки технологии изготовления профилей СИ

Проработка чертежа профиля на технологичность понимается здесь в узком смысле: решается, по сути, вопрос о возможности изготовления данного профиля на данном оборудовании без учета экономических составляющих. На этом этапе может также решаться вопрос об изменении формы или размеров элементов поперечного сечения профиля, исходя из его функционального назначения. В обоснованных случаях возможно изменение параметров угловых зон. Расчет ширины заготовки в данном случае относится только к теоретической развертке сечения профиля, поскольку приращение ширины заготовки для реализации стесненного изгиба может зависеть и от выбранной схемы формообразования, которая включает не только конфигурации профилированной заготовки по переходам, но и расположение калибров в роликах, взаимное расположение калибров на различных переходах.

После определения схемы формообразования можно задавать приращение ширины заготовки и саму ширину заготовки. Затем можно приступать к расчету предварительных и окончательных переходов, проектированию инструмента. Завершается этап разработки оформлением конструкторской и технологической документации. Отметим, что операции производства профильной продукции являются обычно типовыми и не требуют специальных разработок.

При этом следует иметь в виду существенное отличие непрерывного профилирования от поштучного, определяемых преимущественно типом поставляемого материала (штрипса или ленты). Иногда такое различие может вызвать изменение как самой схемы формообразования, так и схемы правки, совмещенной с формообразованием. В необходимых случаях для поштучного профилирования предусматривают дополнительную операцию правки профиля растяжением. Кроме того, отчасти меняется и состав технологического оборудования. Для этих двух видов реализации стесненного изгиба технологическая документация, разумеется, будет существенно различаться.

7.2. Технологичность изготовления профилей

Оценка технологичности профиля может производиться на двух стадиях: на стадии проектирования изделия (профиля) и на стадии технологической под-

готовки производства профиля данного типоразмера [176]. В работе [177] нами рассмотрены различные аспекты технологичности на основе экспертных оценок, где показано, что применительно к заданной номенклатуре гнутых профилей в сферах проектирования, производства и эксплуатации можно рассматривать лишь четыре характеристики технологичности гнутых профилей: функциональность, надежность, соответствие технологическим требованиям и, как интегральный показатель, экономичность. Последний показатель имеет следующие составляющие: трудоемкость, металлоемкость, энергоемкость и хроно-емкость, которые проявляются в основном в сфере производства. Установлены следующие методы обеспечения технологичности: *конструктивная преемственность* (унификация конструктивных элементов, взаимозаменяемость, симплификация), *технологическая рационализация* (параметрическая оптимизация номенклатуры профилей, оптимизационный метод выбора и назначения конструктивных элементов и материалов, размерный анализ, экономикоматематическое моделирование), *технологическая преемственность* (типизация технологических процессов, унификация технологических операций, стандартизация средств технологического оснащения). Указанные методы применяются в практике разработки технологии под заданную номенклатуру профилей в ОАО «Ульяновский НИАТ».

С чисто технологической точки зрения для создания технологии изготовления отдельного профиля важными являются исходные данные (форма профиля, параметры его поперечного сечения, материал, требования к качеству профиля [176]), представленные в структурированном виде на рис. 7.2.

Общие требования технологичности производства профильных деталей типовой номенклатуры, подлежащих изготовлению методами интенсивного формообразования, формулируются следующим образом [130]:

- механические свойства листового материала должны обладать временным сопротивлением разрыву до 390 МПа, относительное удлинение должно быть не менее 6%;
- стремиться к снижению металлоемкости конструкции детали, за счет применения ребер жесткости, отбортовок и т.п.;
- уменьшать ассортимент применяемых толщин листового материала (предпочтительный ряд толщин: 0.6, 0.8, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5 мм);
- конструкция профиля открытого типа более предпочтительна, чем конструкция профиля закрытого и полужакрытого типов, которые фактически не могут быть получены по «чистым» схемам стесненного изгиба;
- допуски на размеры поперечного сечения профилируемых деталей должны соответствовать точности процесса профилирования (9-14-й квали-тет). Допуск на длину детали нецелесообразно назначать менее ± 2 мм;
- избегать сложных конфигураций перфорированных отверстий с узкими и длинными вырезами ($b > 2s$);
- расстояние между перфорированными отверстиями не должно быть ме-нее $(2 \div 3)s$;

- расстояние от края перфорированного отверстия до края профилируемой полосы не должно быть менее $(3 \div 5)s$;
- суммарная площадь перфорированных отверстий в поперечном сечении профилируемой полосы не должна превышать 50-70% от площади заготовки в поперечном сечении;
- минимально допустимые внутренние радиусы гибки составляют, как правило, $0.5s$ и назначать их следует только при конструктивной необходимости;
- минимально допустимая высота отбортовок составляет, как правило, $2s$ и назначать минимальные значения следует только при конструктивной необходимости (для традиционного профилирования высота отбортовок назначается не менее 4 толщин);
- прочность покрытия должна допускать изгиб на относительный радиусгиба не менее единицы.



Рис. 7.2. Исходные данные профиля для анализа технологичности

В принципе, могут рассматриваться и требования к термической обработке, однако это характерно лишь для авиастроения в связи с изготовлением деталей из гнутого профиля-полуфабриката.

7.3. Расчет ширины заготовки и параметры угловой зоны

Ширина заготовки является важным технологическим параметром, определяющим качество профиля. На основе экспериментальных исследований [128], а также с учетом вида НДС, ширина заготовки B_3 , при которой можно получать профили с заданным внутренним радиусом r в условиях плоской деформации, определяются формулой [131, 127]:

$$B_3 = B_p + kS_0n, \quad (7.1)$$

где B_p – ширина развертки профиля; k – коэффициент, зависящий от свойств материала и получаемого внутреннего радиуса (рис. 7.3); n – число зон сгиба.

Ширину развертки профиля B_p находят по формуле:

$$B_p = \sum_{j=1}^M l_j + \frac{1}{S_0} \sum_{i=1}^N \left[(r_i + S_0)^2 - \frac{a \cdot r_i}{2} - R_i^2 + \frac{a_i \cdot R_i^2}{2} \right], \quad (7.2)$$

где M, N – число прямолинейных участков и число зон сгиба соответственно;

l_j – длина j -го прямолинейного участка; r_i, R_i – радиусы кривизны внутреннего и наружного контуров i -ой зоны сгиба ($r_b = r_i/S_0$ на рис. 7.3).

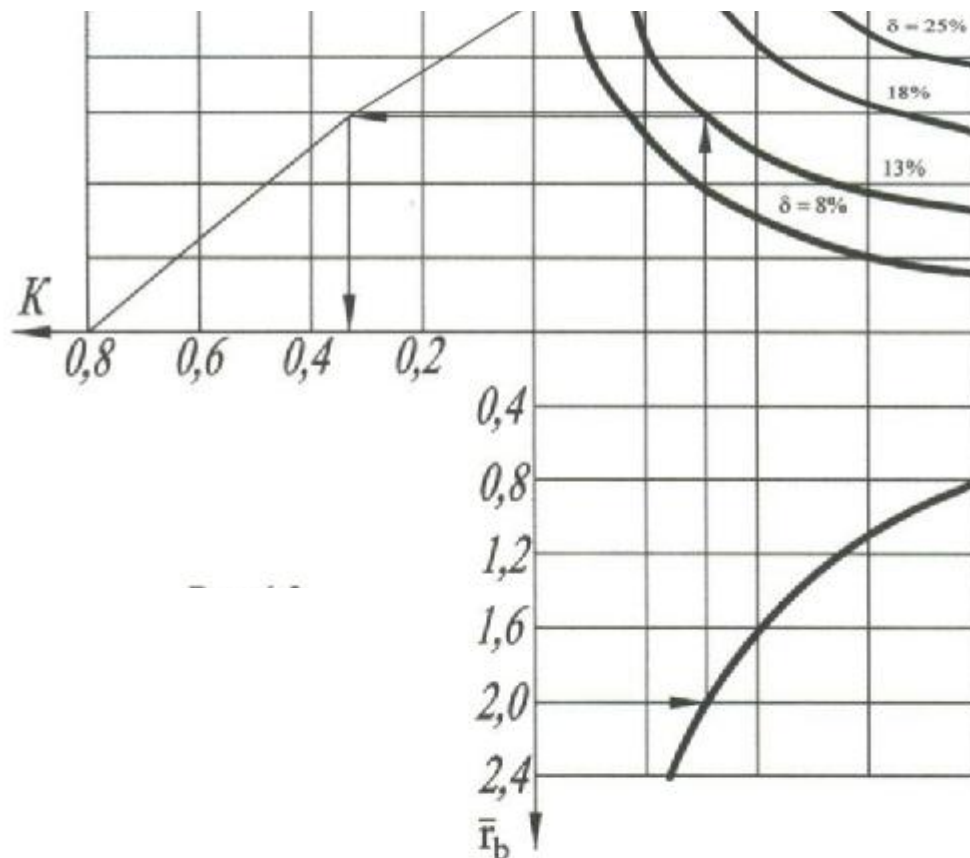


Рис. 7.3. Номограмма расчета коэффициента избытка заготовки

При расчете ширины заготовки в случае свободного формообразования зоны сгиба радиусы в формуле (7.2) подлежат замене:

$$r_i \approx S_0 \bar{a}_0 [1 + k(\alpha, 0, \eta_f)]/2, \quad R_i \approx (\bar{a}_0 + \eta_f) S_0 [1 + k(\alpha, \eta_f, \eta_f)]/2,$$

где $\bar{a}_0$ – относительная большая полуось аппроксимирующего эллипса;

$k(\alpha, \eta, \eta_f)$ – функция геометрической трансформации контура зоны сгиба; η_f – параметр, характеризующий утолщение в зоне сгиба.

Номограмма на рис. 7.3 получена с учетом сравнения относительно удлинения материала заготовки δ и деформаций на наружном контуре в отсутствие дефектов на внутреннем контуре зоны сгиба. На рис. 7.4 представлена номограмма для определения остаточной деформации [127].

При проектировании профиля конструктор обычно задает внутренний радиус и величину утолщения. **Связь геометрических параметров** зоны сгиба определяется простой формулой [178, 179]:

$$(R - r)(1 - \cos \alpha) = S_0(1 - \eta_f \cos \alpha).$$

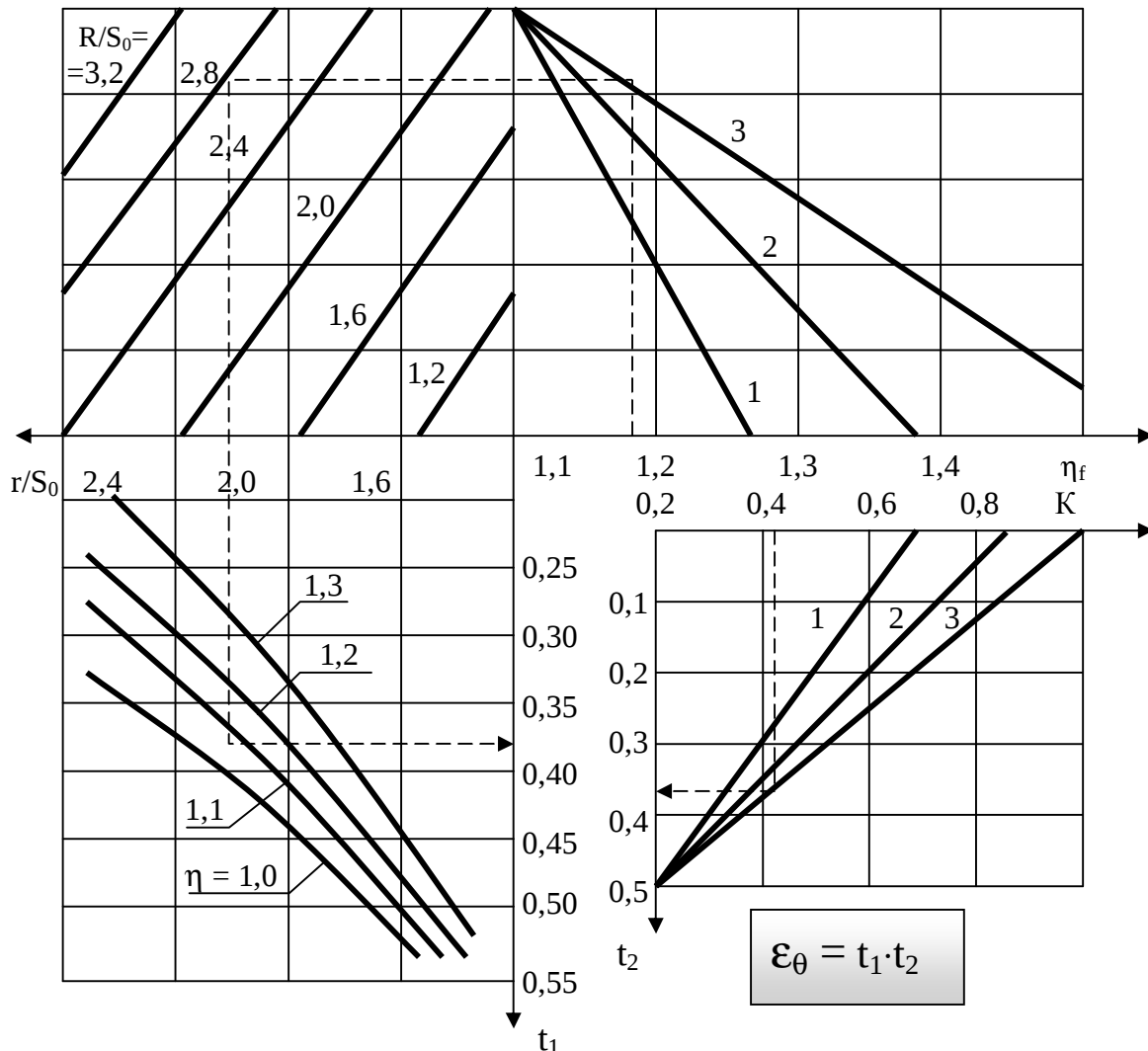


Рис. 7.4. Номограмма для расчета остаточной деформации по наружному контуру зоны сгиба: 1, 2, 3 – $\alpha = \pi/3; 2\pi/5; \pi/2$

В работе [127] построена номограмма для удобства определения параметров угловой зоны. Последняя формула может использоваться как при разработке конструкции профиля, так и при назначении скругления соответствующих участков роликов при разработке технологического оснащения.

Отметим, что сочетание внутреннего радиуса и утолщения влияют и на значение коэффициента концентрации напряжений при работе профиля на кручение в условиях циклического нагружения. Для авиационных конструкций данная взаимосвязь является определяющей при назначении геометрических параметров зоны сгиба на стадии разработки конструкции профиля. Предельные возможности при стесненном изгибе можно определять по графикам раздела 4 книги, а также номограмме Ю.М. Арышенского [94, 96, 127].

7.4. Выбор схем формообразования

Выбор и описание схем формообразования приведены в разд. 4.

7.5. Выбор параметров зоны сгиба

Формообразование заготовки стесненным изгибом на окончательном переходе предусматривает четыре варианта приложения радиальных усилий: III, 1 – IV, 1 (двухстороннее обжатие), III, 1 – IV, 2 (посадки внутреннего контура); III, 2 – IV, 1 (посадки наружного контура); III, 2 – IV, 2 (свободное формообразование). В работе [180] были исследованы все четыре варианта на швеллерах профилях из материала 1420 в различных состояниях. Выбранный вид профиля легко обобщается на другие виды профилей, кроме того, ввиду простоты его конфигурации уменьшаются трудозатраты на изготовление оснастки и проведение эксперимента.

В процессе исследования использовали трапецевидные заготовки. Предельные значения ширины заготовки B_{3n} определяются формулами:

$$B_{3n} = a + \frac{b-a}{L} X_d, \quad \Delta \bar{B} = (B_3 - B_k) / S_0,$$

где a, b – ширина узкого и широкого оснований заготовки соответственно; $\Delta \bar{B}$ – избыток ширины заготовки; L – длина заготовки; X_d – расстояние от узкого основания заготовки до местоположения дефектного сечения профиля; B_3, B_k – ширина заготовки и ширина развертки калибра соответственно.

В табл. 7.1 приведены диапазоны предельных значений параметров зоны сгиба различных вариантов профилей.

При свободном формообразовании (табл. 7.1, вариант 1) утолщение зоны сгиба не достигает больших значений, во-первых, из-за аксиальной вытяжки, а во-вторых, из-за дефектов внутреннего контура (зажимы более 100 мкм). При ограничении по внутреннему контуру (табл. 7.1, вариант 1) посадка внутреннего контура на инструмент возможно лишь при небольшом избытке заготовки. При этом утолщение не превышает пяти процентов. Увеличение ширины заготовки «отбрасывает» материал в сторону наружного контура и контакт по внут-

ренному контуру не имеет места. Следует отметить, что радиус скругления участка инструмента, контактирующего с внутренним контуром зоны сгиба, не должен быть большим, ибо в этом случае контакт вообще невозможен, а при малом радиусе скругления инструмента повреждается внутренний контур зоны сгиба.

Варианты 2 и 3 (табл. 7.1) являются практически равноправными при значениях наружного радиуса R_n более $1,5S_0$. На рис. 7.5 приведена зависимость относительной толщины элементов профиля от избытка ширины заготовки $\Delta\bar{B}$ для варианта с двусторонним обжатием зоны сгиба, откуда видно, что при утолщениях зоны сгиба, откуда видно, что при утолщениях зоны сгиба более 15% имеет место значительная аксиальная вытяжка материала (до 7%). При этом полки у торцов утолщаются, а стенка утоняется (происходит раскатка стенки, на что указывалось предыдущих разделах работы).

Таблица 7.1

Геометрические параметры уголковой зоны

Варианты формообразования	$\Delta\bar{B}$	$\bar{R}_n$	$\bar{r}_b$	η_f
1. III, 2 – IV, 1	0 – 0,5	–	1,0 – 2,0	1,0 – 1,10
2. III, 2 – IV, 2	0,5 – 1,5	1,5 – 2,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,15
3. III, 1 – IV, 1	0,5 – 2,0	1,5 – 2,0	0,8 – 1,2	1,05 – 1,15
4. III, 1 – IV, 2	0,5 – 1,0	–	0,8	1,0 – 1,05
Здесь $\bar{r}_b \approx \frac{a_0}{2} [k(\alpha, 0, \eta_f) + 1]$, где a_0 – большая полуось аппроксимирующего эллипса.				

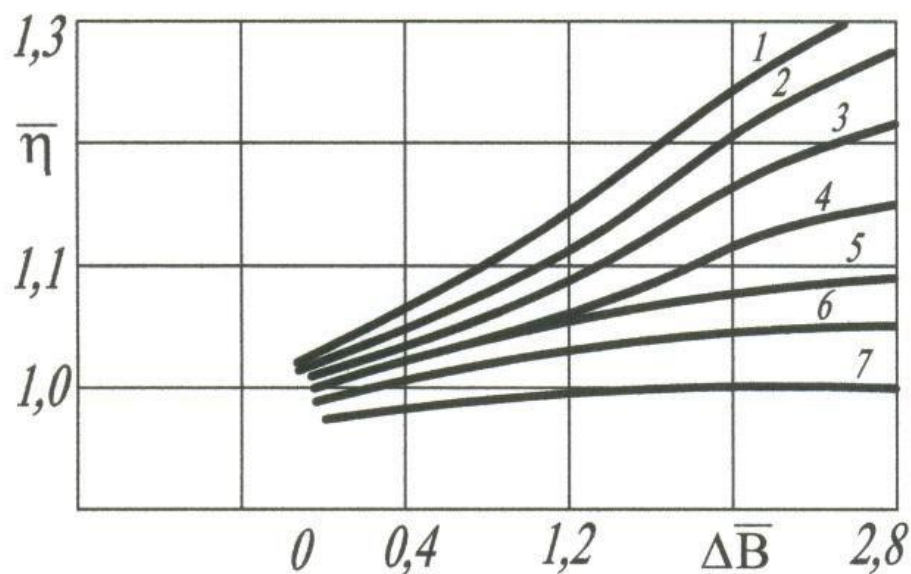


Рис. 7.5. Изменение толщины элементов профиля: 1 – 4 – зоны сгиба (значения R_n : 1 – $0,8 \cdot S_0$; 2 – $1,3 \cdot S_0$; 3 – $1,6 \cdot S_0$; 4 – $1,8 \cdot S_0$); 5 – удлинение профиля; 6, 7 – утолщение полок и стенки

Рис. 7.6 представляет зависимость относительной толщины зоны сгиба от наружного радиуса калибра для схемы с ограничением по наружному контуру, из которого следует, что при больших значениях R_n геометрические параметры зоны сгиба приближают этот вариант к варианту со свободным формообразованием, а потому при утолщениях $\bar{\eta}_f > 1,15$ имеют место дефекты по внутреннему контуру зоны сгиба (зажимы более 100 мкм).

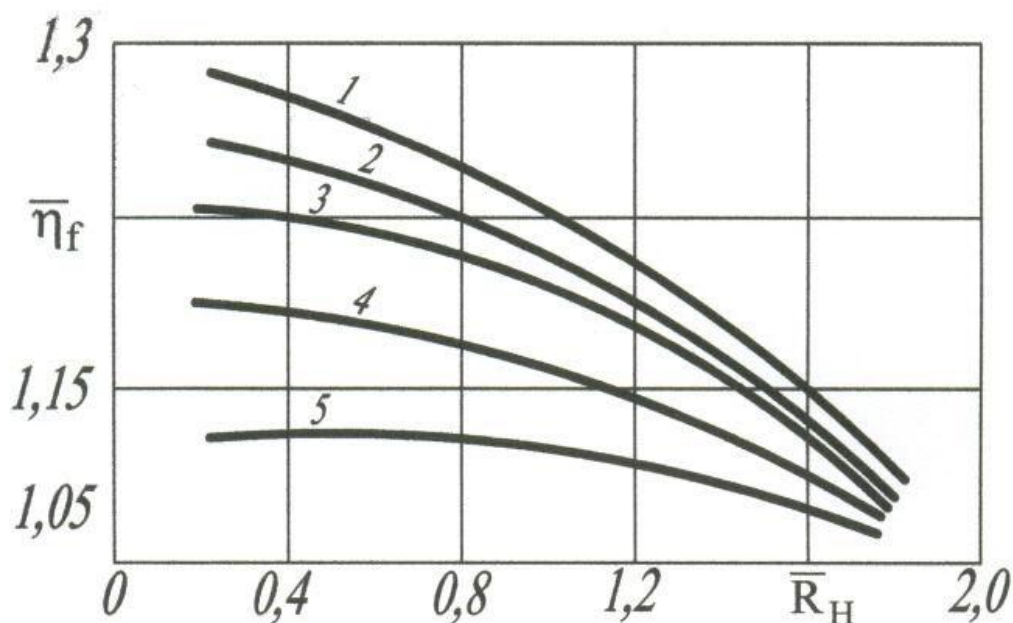


Рис. 7.6. Изменение толщины зоны сгиба:
1, 2, 3, 4, 5 – $r_b = 2,5; 1,8; 1,2; 0,8; 0,4$ соответственно

Таким образом, наиболее благоприятными вариантами формообразования являются варианты «2» и «3» (см. табл. 7.1), которые позволяют получать максимальные утолщения и малые радиусы.

7.6. Учет влияния аксиального сжатия

Интенсификация процесса формообразования на уровне угловой зоны может достигаться за счет приложения заднего или переднего подпора с целью предотвращения продольной вытяжки материала, более полного заполнения угловой зоны и снижения уровня остаточных напряжений.

7.6.1. Для изучения влияния заднего подпора (схема I, 2 – . . .) на характеристики профиля исследовали формообразование швеллерного профиля из материала 1420 и Д16чТ согласно процедуре работы [122]. Здесь брали вариант посадки наружного контура, причем, относительный радиус инструмента был равен 1,6, что обусловлено условиями приближения значений параметров эксперимента к их практическим значениям. Данный вариант выбран еще и с той целью, что здесь имеется возможность изменения внутреннего радиуса в отличие от варианта с двусторонним обжатием зоны сгиба. На рис. 7.7 представлены графические зависимости утолщений зоны сгиба от ширины заготовки для

различных величин аксиального поджатия после обработки результатов методом наименьших квадратов. При погрешности параметров прямых менее 7% из рис. 7.7 следует, что увеличение толщины происходит не более, чем на 5 %, а в диапазоне практических значений параметров утолщение не превышает двух–трех процентов. Значения внутреннего относительного радиуса изменений практически не испытывают. Однако происходит снижение до 12 МПа остаточных напряжений на стенке и на полках (в отсутствие аксиального поджатия остаточные напряжения могут достигать значений порядка $0,7 \sigma_T$).

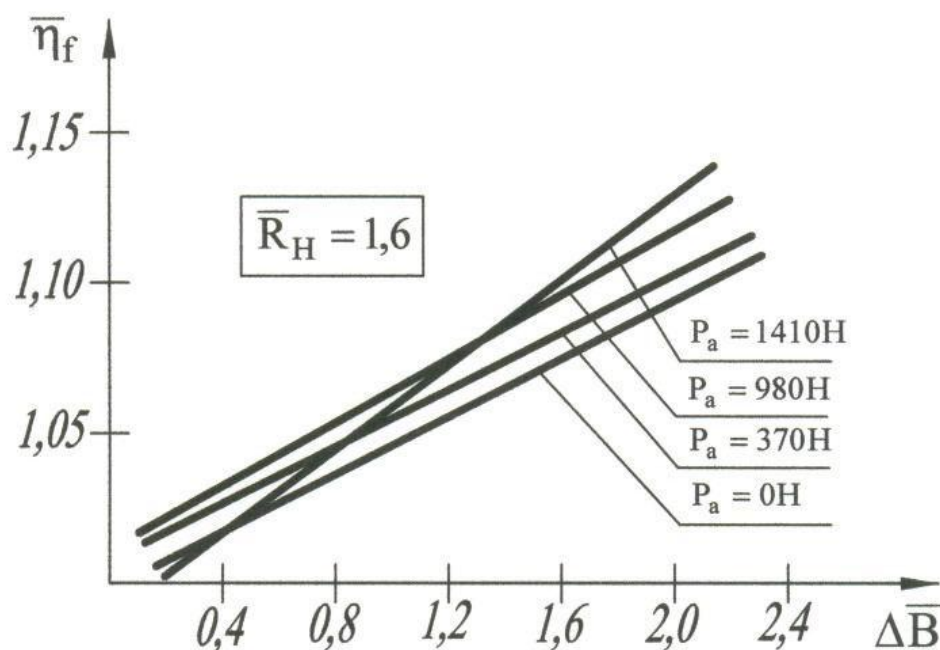


Рис. 7.7. Изменение утолщения при заднем подпоре P_a

7.6.2. Для создания переднего подпора использовали схему, изображенную на рис. 3.14. В качестве элемента, создающего аксиальную силу, применяли специальное правильное устройство станка ГПС–200М1 с удлиненной фильерой (длиной 200 мм) и специальным дополнительным устройством замыкания, позволяющим осуществлять регулировку величины силы поджатия. Предварительные исследования проводили при отключенных роликах предварительных переходов (раздвигались валы). Постановочные эксперименты показали, что при увеличенном зазоре в роликах окончательного формообразования $s_k = 2,5–1,3$ мм швеллерный профиль из материала 1420 (рис. 3.16, а) останавливался при силах от 2,6 до 4,3 кН. При включенных клетях предварительного формообразования в случае создания аксиальных сил порядка 7,0–7,5 кН при номинальной ширине заготовки происходило разрушение профиля в очаге деформации.

Эксперименты по исследованию влияния переднего подпора проведены при действующих клетях предварительных переходов. Изучали формообразование швеллерного и зетобразного с отбортовками профилей (рис 3.16, а., д), для которых относительные радиусы наружного контура инструмента в уголкового зоне составляли 1,6 и 2,5 соответственно.

На рис. 7.8 и 7.9 представлены графики зависимости утолщения от величины переднего подпора ($\Delta B = k \cdot n$) для выбранных типов профилей, откуда видно, что приложение аксиальной силы позволяет существенно увеличить толщину зоны сгиба.

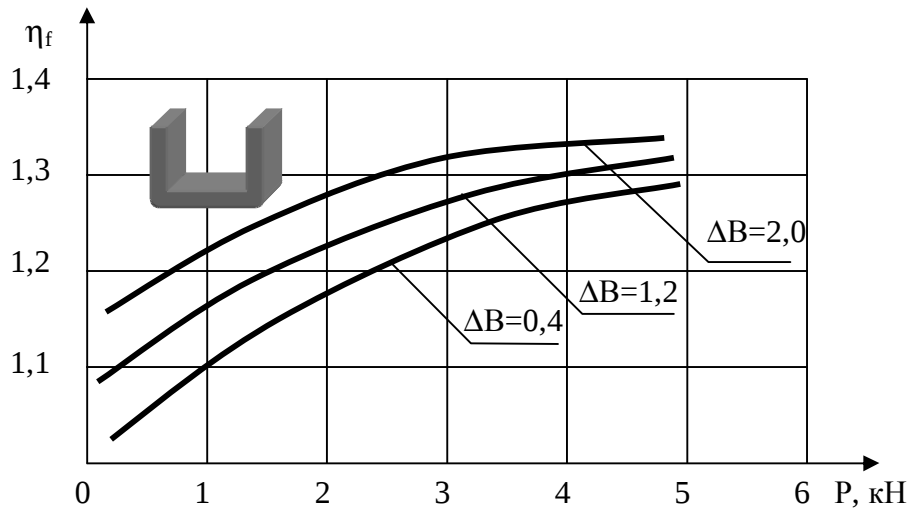


Рис. 7.8. Зависимость утолщения от переднего подпора

На рис. 7.9 рост утолщения с увеличением усилия переднего подпора несколько меньше, чем на рис. 7.8, что объясняется различием наружных контуров зон сгиба и увеличением сопротивления пластической деформации при меньшей кривизне наружного контура. С ростом утолщения внутренний относительный радиус также несколько увеличивается: значение его может быть вычислено по формуле [33]:

$$\overline{r_b} = \overline{R_n} - (1 - h_f \cos a) / (1 - \cos a).$$

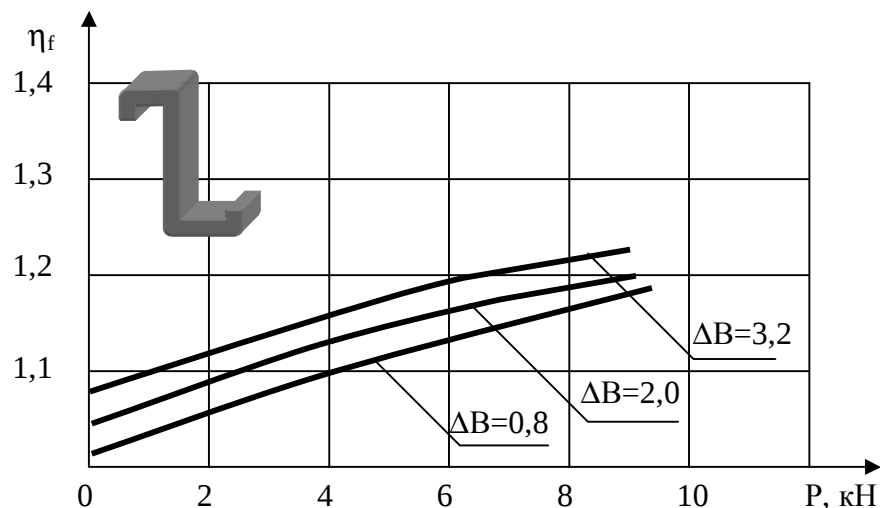


Рис. 7.9. Зависимость утолщения от переднего подпора

При наличии аксиального поджатия обеспечивается прямолинейность профиля, а также снижаются значения остаточных напряжений на (40 – 80) %.

Однако приложение переднего подпора имеет и ряд недостатков:

- неравномерность утолщений по углам у концевых частей профиля, изготавливаемого из листа;
- в некоторых случаях разрушение профиля при плохом попадании в фильеру;
- большие усилия выдергивания профиля из фильеры;
- при больших величинах усилий подпора у профилей из плакированных материалов на поверхности остается блестящий след;
- нагрев и преждевременный износ фильер.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что применение данного варианта технологии наиболее целесообразно в случае:

- особых требований к утолщению в зоне сгиба;
- применения неплакированного рулонного материала.

Для извлечения профиля из фильеры в одной из модификаций профилировочных станков ГПС–200М11 предусмотрено специальное устройство извлечения профиля, устанавливаемое за правильным устройством.

Отметим также, что предельные значения сил практически не достигаются в процессе формообразования при номинальных значениях избытка заготовки.

7.7. Выбор профилировочного оборудования

Для производства СИ профилей для авиационных конструкций выбор оборудования определен в соответствующей отраслевой нормативно-технической документации [132, 131, 135, 127]. В основном, это – станки модели ГПС-200х, хотя технология производства профилей для самолетов АН-70 и АН-140 была реализована в 2001 г. на базе станка ГПС-300.

В общем случае процедура выбора профилировочного станка должна следовать методике раздела 4 данной книги:

- Определение распирающей силы и момента;
- Расчет мощности привода и диаметра рабочих валов;
- Расчет межклетьевого расстояния;
- Установление ширины развертки заготовки, ее толщины и марки материала;
- Определение числа переходов для данного профиля на основе работы [127];
- Сравнение расчетных данных мощности привода, диаметра рабочих валов, межклетьевого расстояния, характеристик заготовки и числа переходов с паспортными данными наличного парка станков, выбор оборудования.

7.8. Требования к технологической оснастке

Основное технологическое оснащение процесса изготовления профилей включает [127]:

- оснастку для формообразования профилей в составе роликов формующих и фильер правильных;
- оснастку для раскройно-заготовительных операций в составе ножей дисковых, роликов подрезных, роликов разрезных;
- оснастку для отделки профилей (шаберы, губки зажимные и прочее).

Общие требования к инструменту изложены в работах [131, 132] и отражены в табл. 7.2. Ниже приводится описание оснастки и излагаются специфические требования к инструменту, выработанные в процессе отладки технологии и при производстве профилей [127, 135].

7.8.1. Комплекты формующих роликов, устанавливаемые на валы рабочих клеток профилировочных станков, при соединении нижнего и верхнего роликов каждой клетки образуют роликовые пары с рабочим зазором–калибром, соответствующим форме технологического перехода.

Замыкание рабочего контура, осуществляемое по торцам калибров, обеспечивается специальными конструктивными элементами двух типов: буртами (рис. 7.10, а, б), применяемыми при горизонтальном расположении краевых элементов профиля, и уступами (рис. 7.10, в, г, д) – при их вертикальном расположении.

Равномерность боковых (вертикальных) зазоров в калибре, исключение возможности относительного смещения роликов в осевом направлении обеспечивается соединением верхнего и нижнего роликов торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадкой в замок по H7/f7 на окончательном и по H8/l8 на предварительных переходах. В отдельных случаях соединение роликов следует производить с помощью дополнительных элементов типа «паз – выступ» (рис. 7.10, д). При небольших углах подгибки и надежной фиксации полосы в направляющем устройстве допустимо применение открытых калибров (рис. 7.11, а). Число роликовых пар и конфигурации калибров должны соответствовать выбранным схемам формообразования. Однако для предварительных переходов, с целью использования одного и того же калибра для заготовок с различной шириной, допускается упрощение конфигурации калибров за счет замены криволинейных участков, соответствующих внешнему контуру мест изгиба, отрезками, являющимися продолжением наклонных и горизонтальных прямолинейных участков (рис. 7.11, в), а также за счет выполнения углов освобождения (рис. 7.11, г).

На первом переходе целесообразно применение направляюще профилирующих роликов с вертикальными осями (рис. 7.11, д), в которых формоизменение осуществляется за счет направленной потери устойчивости при торцевом сжатии заготовки. Для предварительных переходов возможно использование сборных роликов.

Основные требования к инструменту

Тип оснастки	Вид инструмента	Материал	Параметры рабочего контура				Характерный размер, мм
			Точность	Шероховатость	Твёрдость	Отклонение формы, мм	
Для формообразования	Ролики предварительные	9ХС, ХВГ, ШХ15	8 – 10	0,63 – 0,32	58 – 62	радиальное и торцовое биение не более 0,03	Диаметр 150 – 200
	Ролики окончательные	9ХС, ХВГ, ШХ15	7 – 8	0,32 – 0,16	56 – 60	радиальное и торцовое биение не более 0,10	Диаметр 150 – 200
	Фильеры	Бр АЖ9-4	10 – 12	0,32 – 0,16	Без термообработки	неперпендикулярность и неплоскотность не более 0,05	Длина 90 – 100
Для резки	Ножи дисковые, ролики подрезные и рарезные	9ХС, ХВГ, ШХ15, Х12М	6 – 7	0,63 – 0,32	60 – 64	торцовое биение не более 0,02	Диаметр 130 – 150
Для отделки	Шаберы	Р6М5, Р18, ХВГ	10 – 12	1,25 – 0,63	60 – 64	-----	Толщина 2 – 3
	Губки зажимные	40Х, 30КГСА	8 – 10	Рифление	45 – 50	-----	Длина 100 – 200

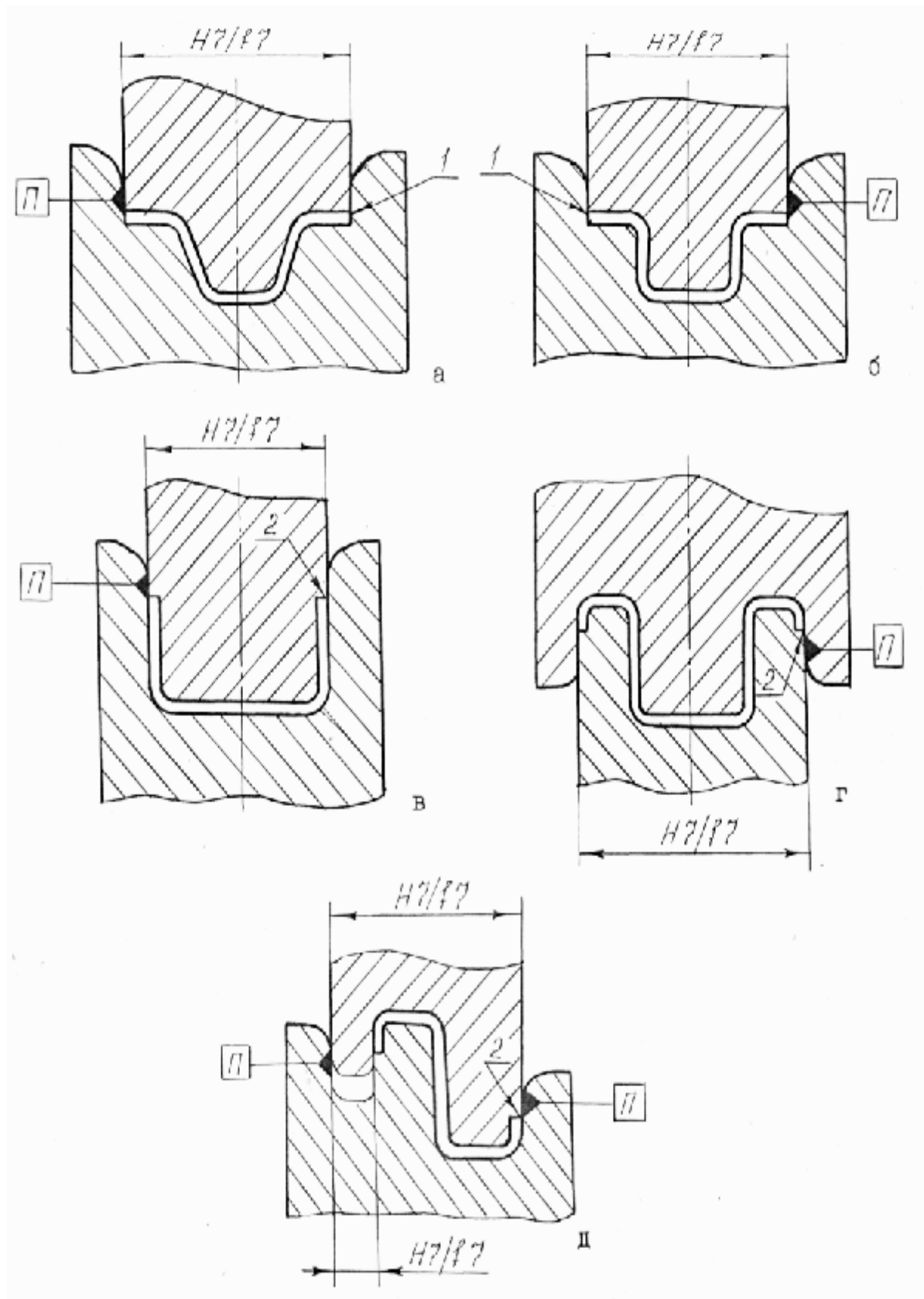


Рис. 7.10. Типы калибров роликов окончательных переходов:
1 – бурты; 2 – уступы; П – базовые поверхности роликов

Диаметры формирующих роликов на всех переходах следует выбирать конструктивно, исходя из межцентрового расстояния и необходимости обеспечения в радиальном направлении запаса материала не менее 5 – 13 мм.

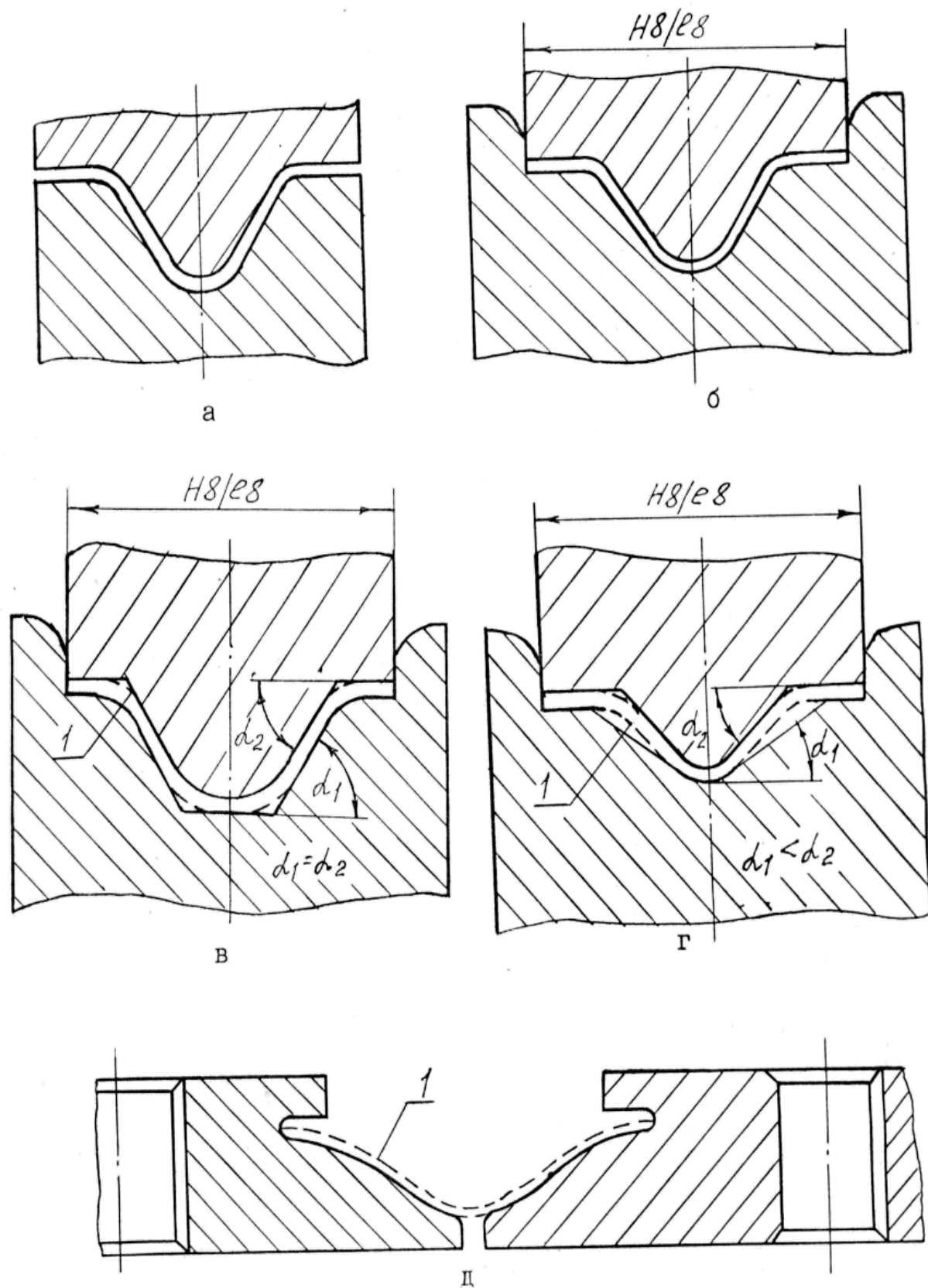


Рис. 7.11. Типы калибров роликов предварительных переходов:
1 – расчетный калибр перехода

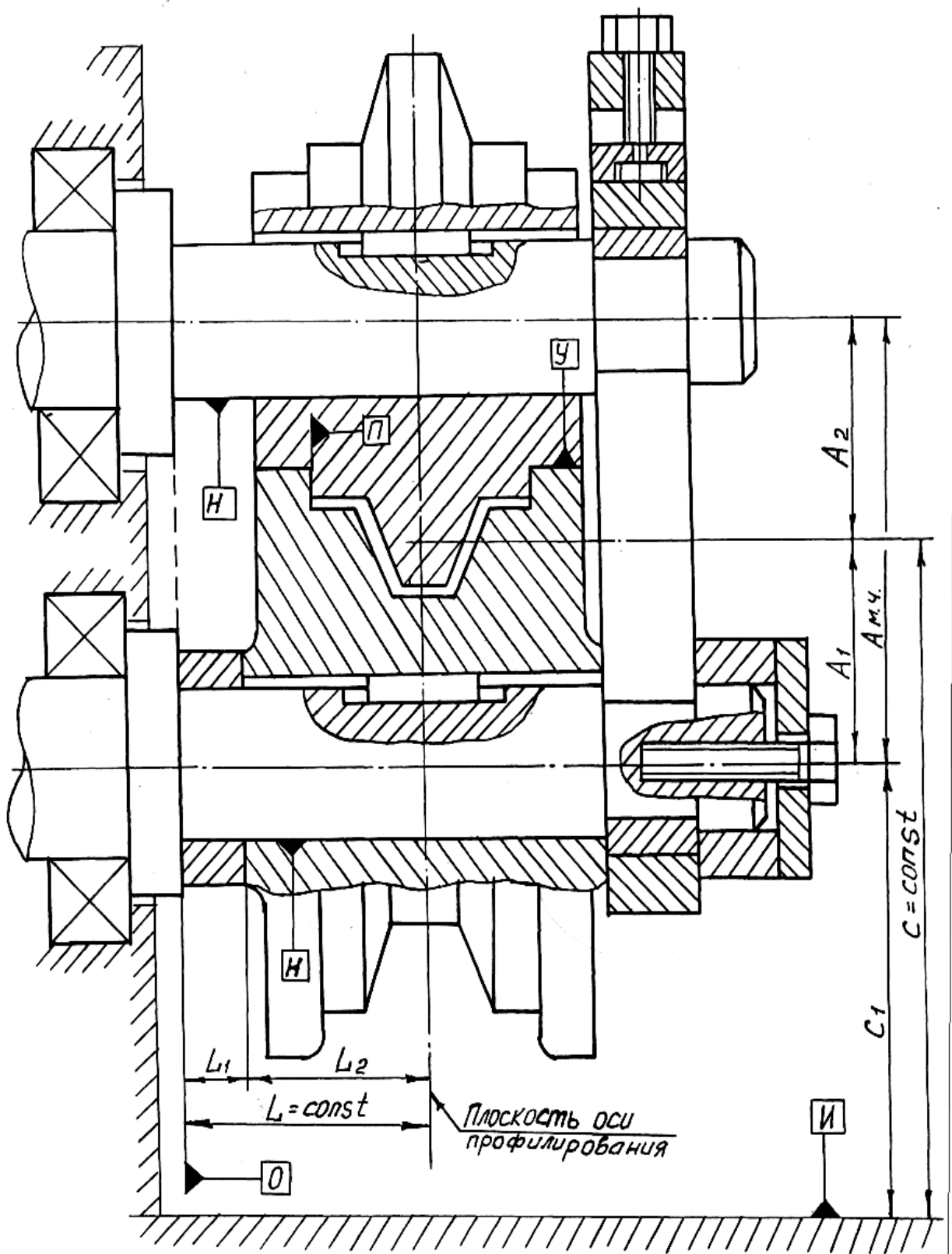


Рис. 7.12. Установка оси профилирования и базирование поверхностей: О – опорная база; Н – направляющая база; И – измерительная база

При глубине формовки до 50 мм диаметры роликов следует брать в диапазоне от 150 до 200 мм. Бурты роликов надлежит выполнять толщиной 15 – 25 мм со скруглением по радиусу не менее 5 мм, либо в сочетании скругленного и наклонного прямолинейного участков. Перекрытие буртов и охватываемого

ролика должно быть по высоте не менее 3 – 5 мм. Посадочные места роликов должны соответствовать диаметрам рабочих валов и обеспечивать посадку типа Н7/г6. Простановку размеров рабочего контура роликов следует производить от посадочных баз комбинированным методом.

Для облегчения и упрощения настройки и обеспечения надлежащего качества профиля ось профилирования должна располагаться на уровне центров масс сечения по всем переходам.

Равномерность и постоянство зазоров в осевом и радиальном направлениях обеспечиваются базированием роликов друг по другу; причем в осевом направлении базирование осуществляется посредством замкового соединения, а в радиальном направлении – за счет баз ступицы и буртов роликов (рис. 7.12).

7.8.2. Фильеры [127] предназначены для правки профилей и создания аксиального поджатия в процессе их формообразования. Фильера представляет собой пару выполненных из бронзы и продольно профилированных с одной рабочей стороны призм, образующих рабочими сторонами контур, соответствующий конфигурации профиля. Для надежного попадания профиля в калибр каждый паз рабочего контура фильер должен иметь заходный прямолинейный наклонный или скругленный по дуге окружности участок. Места сопряжения прямолинейных заходного и рабочего участков фильеры должны быть плавно округлены, а концевые участки следует профилировать по форме сопрягаемых с фильерой роликов с целью облегчения захода профиля в фильеру (рис. 7.13). Габаритные размеры фильер должны быть унифицированы и, для станков семейства ГПС, иметь размеры поперечного сечения 84х90 мм, а их длина должна составлять не менее трех максимальных размеров поперечного сечения профиля. Установку фильер в гнездо правильного блока следует производить по посадке типа Н11/д11.

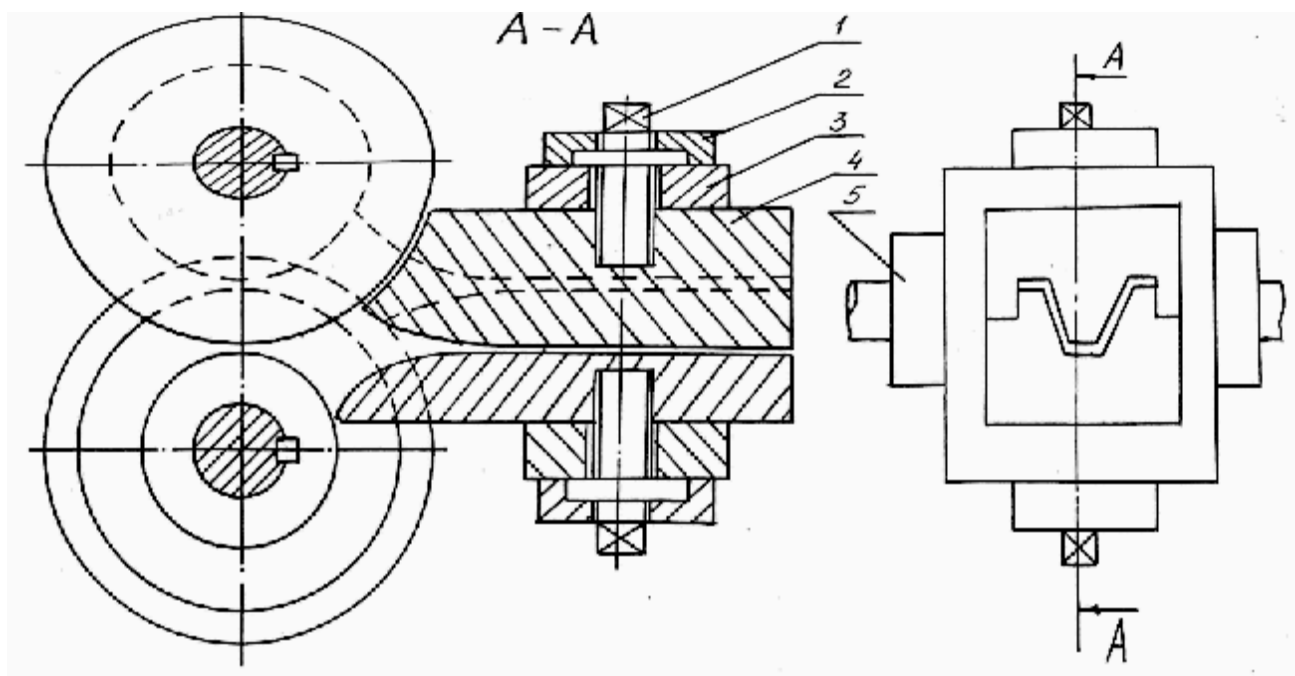


Рис. 7.13. Фильера правильная: 1 – винт; 2 – крышка; 3 – корпус; 4 – фильера; 5 – коромысло

7.8.3. Ролики подрезные, разрезные и дисковые ножи является традиционным инструментом, на который распространяются общие требования к отрезному инструменту (см. табл. 7.2).

7.9. Особенности изготовления зетобразных и специальных видов профилей

Как было показано в разделе 4, изготовление зетобразных профилей может осуществляться путем формообразования симметричного корытообразного профиля с отбортовками и его последующей разрезкой. Однако после разрезки из-за неуравновешенных остаточных напряжений разрезанные профили имеют, как правило, прогиб и скрутку. Для устранения этого недостатка следует использовать схему с передним подпором (максимально допустимым) или производить формовку за четыре перехода обычного зетобразного профиля по схеме рис. 7.14, а. В случае малопластичных материалов можно использовать шесть переходов (рис. 7.14, б). Разумеется, в этом случае следует использовать шестиклетьевого станок семейства ГПС. При изготовлении зетобразных профилей с отбортовками следует применять схему [137], в которой на первых двух переходах формуют профиль волнообразной формы, на предпоследнем переходе производят осадку стенки профиля с оформлением уголко-вых зон (рис. 7.15, а). На последнем переходе одновременно с разрезкой осуществляют осадку дугообразных участков с получением горизонтальных полок с отбортовкой (рис. 7.15, б) и с обжатием сечения профиля по толщине в пределах упругости с передним подпором или без него.

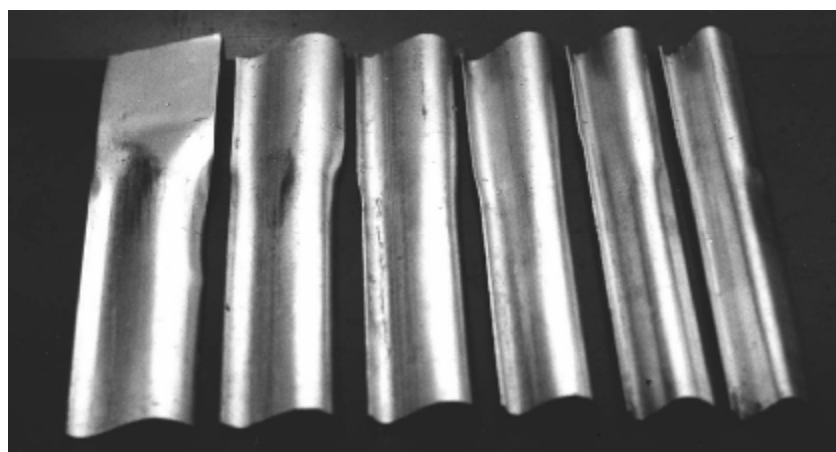
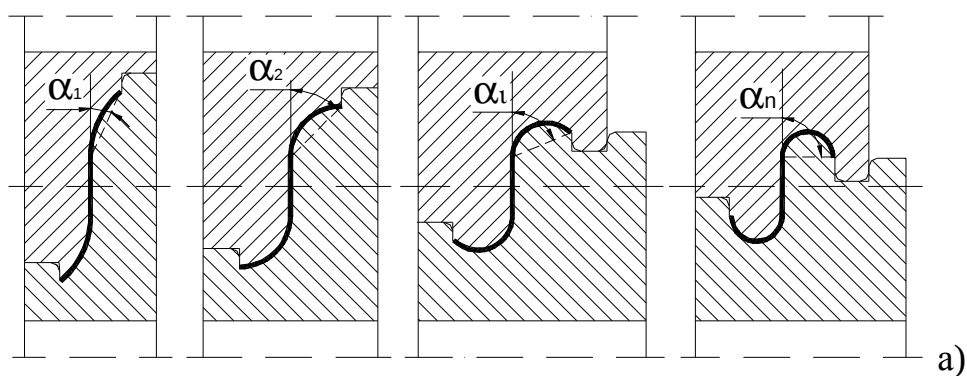


Рис. 7.14. Изготовление зетобразного профиля

Данная схема позволяет уравновесить остаточные напряжения в каждом из зетобразных профилей, устранить скручивание и уменьшить число технологических переходов (за счет устранения дополнительной операции разрезки).

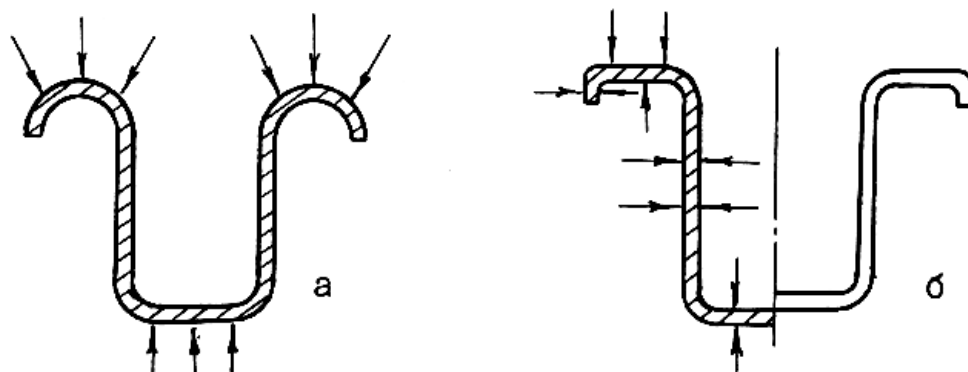


Рис. 7.15. изготовление зетобразного профиля с одной отбортовкой

При разработке схем формообразования для специальных видов профилей наряду с общими принципами проектирования переходов разработчику необходимо следить за тем, чтобы выполнялись условия отсутствия переформовки, то есть протяженность зоны деформирования не должна превышать величины межклетьевого расстояния [141]. В противном случае, это приводит к снижению пластических свойств материала, необходимых для последующего формообразования (или к разрушению заготовки), необоснованным энергозатратам и преждевременному износу инструмента.

Удовлетворить выше сформулированному требованию можно путём наложения ограничения на величину угла подгибки Q_k на текущем переходе:

$$Q_k < \frac{3S_0 L^2 (2 - r/R)}{8b^3},$$

где S_0 – толщина заготовки; L – величина межклетьевого расстояния; r , R – радиусыгиба на текущем и предшествующем ему переходах; b – ширина подгибаемой полки.

На рис. 7.16 представлены комплекты роликовой оснастки для изготовления профилей стесненным изгибом.



Рис. 7.16 Комплекты формирующих роликов для реализации технологии стесненного изгиба на станках семейства ГПС

7.10. Технологические маршруты изготовления профилей и деталей

7.10.1. Влияние маршрута на механические свойства профиля

Под технологическими маршрутами подразумевается последовательность операций изготовления профилей и деталей из них, правки, промежуточной и окончательной термообработки и другие, а также их режимы. Важность определения технологических маршрутов для авиационной технологии обусловлена тем, что изготовленные профили в дальнейшем подвергаются последующим формообразующим операциям, требующим определенного запаса пластичности материала. Выполнение же межоперационных термообработок может снижать прочность авиационных сплавов до 10 %.

При принятии решения по назначению технологических маршрутов основывались на результатах, приведенных в разд. 4 – 6, касающихся исследований свойств и поведения авиационных сплавов, из которых изготавливали гнутые профили. Для указанной номенклатуры профилей (рис. 4.3) кроме исследований, описанных в разд. 4, проведены механические испытания профилей из сплавов Д16чА, В95пчА и 01450, полученных по различным технологическим маршрутам. Использовали образцы, вырезанные из каждого элемента профиля согласно ГОСТ 11701-84 при скорости нагружения 10 мм/мин на машине FP 100/1 по методике ГОСТ 1497-84.

Испытания уголкового образца (нестандартных) проводили на установке ИМАШ (АЛА-ТОО 20-75) с использованием захватов специальной конструкции. На основе пятикратных замеров проводилась статистическая обработка полученных данных. Доверительный интервал для σ_b и $\sigma_{0,2}$ составил ± 10 МПа, для δ – ± 1 % при вероятности 0,95.

Свойства элементов профилей из сплавов Д16чА и В95пчА, изготовленных по аналогичным маршрутам и получившим близкие степени деформации ($h_f = 1,06$, $\bar{r} = 2,0$), изменяются в различной степени (табл. 7.3). Прочностные свойства практически всех элементов профиля из сплава В95пчА находятся на одном уровне, в то время как в уголкового профилях из Д16чА имеется небольшое (около 6 %) снижение прочности вследствие его склонности к рекристаллизации (укрупнение зерна) (табл. 7.4).

Более тщательные исследования показали, что снижение прочности уголкового профиля на (4 – 6) % происходит, если укрупнение зерна наблюдается по всему сечению. В случае мелкозернистой структуры или наличии не больших приповерхностных участков с укрупненным зерном в зонах сгиба прочность возрастает до 15%, причем, наибольший рост происходит в зонах сгиба со значительными утолщениями.

Также обнаружено появление крупнокристаллических ободков и зон крупного зерна в профилях, подвергшихся нагреву до температур, превышающих температуру рекристаллизации для данного сплава.

Испытания образцов профилей из сплава 01450 с различными утолщениями, не подвергавшихся перезакалке после деформации, показывают увеличение предела прочности до 8 % для профилей с утолщением зоны сгиба 9 % и

на (2 – 15) % для профилей с утолщением 27 % по сравнению с листом, подвергнутым аналогичному режиму старения. По зонам сгиба профилей с утолщениями порядка 9 % предел прочности возрастает по сравнению с листом на 6 – 10%. Режим старения существенно влияет на предел прочности материала у профилей с утолщением зоны сгиба в 27 %: при одноступенчатом старении наблюдается рост на 8 %, а при двухступенчатом – снижение на 4 %.

Перезакалка приводит к общему снижению прочностных характеристик и увеличению δ как профилей, так и исходного листа сплава 01450. Характерно, что на профилях с утолщением 9 % механические свойства всех элементов профиля сохраняются практически на одном уровне, а у профилей с утолщением 27 % перезакалка приводит к падению прочности на 7 – 10% по зонам сгиба, что объясняется появлением крупного зерна по всему сечению зоны сгиба профилей, прошедших перезакалку.

7.10.2. Разработка маршрутов и директивной технологии

Для обеспечения рациональной организации изготовления деталей из профилей, создания специализированных участков групповых технологических процессов и поточных линий, была принята технология изготовления деталей в два этапа [181]. На первом этапе осуществляли изготовление длинномерных профилей как исходных полуфабрикатов [182], а на втором – деталей из них.

Анализ возможных вариантов технологических маршрутов изготовления профилей позволил выделить два основных [131]: первый, связанный с формообразованием профиля в свежезакаленном состоянии, и второй, предусматривающий формообразование профиля в отожженном состоянии.

Состав операций технологических маршрутов и их последовательность при изготовлении профилей по вариантам приведены в табл. 6.3. Второй вариант предпочтительнее первого вследствие того, что он дает больший временной интервал для выполнения последующих операций (гибки, подсечки) в свежезакаленном состоянии заготовки. Это и определило выбор его в качестве базового варианта. Применение первого варианта ограничивалось лишь изготовлением деталей длиной более 6 м в связи с небольшими размерами наличного термического оборудования. Отметим, что разработка технологических маршрутов изготовления деталей (табл. 6.4) базировалась на конструктивном классификаторе деталей стрингерного набора летательного аппарата, насчитывающем около 1500 деталей. Классификатор деталей также влияет на предпочтение того или иного технологического маршрута изготовления профилей, как, впрочем, и организация поточного производства профилей и деталей стрингерного набора. Например, сетевой график выполнения работ по отсекам самолета, наличное профилировочное, профилегибочное и термическое оборудование могут предписывать изменение технологического маршрута. Разумеется, такие организационные меры не способствуют повышению ресурса планера самолета, однако при надлежащей оценке и при согласовании с ОКБ и ВИАМ они могут быть приняты в случае настоятельной необходимости.

Предложенные технологические маршруты были согласованы с ОКБ, ВИАМ (в отношении механических свойств и размеров зерна) и Головным НИАТ (по вопросам термической обработки заготовок и профилей).

Технологические маршруты изготовления профилей

Вариант 1: Исходное состояние материала – отожжённое (М) или состаренное (Т, Т2)	
Профили без подсечек	Профили с подсечками
1. Раскрой листа и обезжиривание заготовки. 2. Закалка 3. Формообразование в свежезакаленном (с/з) состоянии 4. Правка растяжением в с/з состоянии 5. Обезжиривание (для сплава В95) и старение искусственное (В95) или естественное (1163) 6. Контроль геометрии, свойств и структуры	1. Раскрой листа и обезжиривание заготовки 2. Закалка 3. Формообразование в свежезакаленном (с/з) состоянии 6. Контроль геометрии, свойств и структуры
Вариант 2: Исходное состояние материала – отожженное	
1. Раскрой листа 2. Формообразование 3. Обезжиривание и смазка 4. Правка растяжением в с/з состоянии 5. Старение искусственное (В95) или естественное (1163) 6. Контроль геометрии, свойств и структуры	1. Раскрой листа 2. Формообразование

Технология производства деталей из профилей, полученных по первому или второму вариантам (табл. 7.3), предназначалась для ММЗ им. С.В. Ильюшина с целью постановки деталей различной длины четырех типов: прямолинейных (с подсечками или без них) и криволинейных (с подсечками или без них) [134] на три опытные машины.

На основе табл. 6.3 и 6.4 была разработана, согласована с соответствующими организациями и передана заказчику директивная технология для подготовки серийного производства самолета «ИЛ-114» [181] в городах Ташкент и Фергана. В дальнейшем опыт производства гнутых профилей для авиастроения был расширен, обобщен для производства и других типов самолетов, выпущена отраслевая нормативно-техническая документация.

Разработанная документация: директивный технологический процесс, руководящий технический материал, технологические рекомендации и производственные инструкции отражают все вопросы проектирования и изготовления оснастки, настройки оборудования, контроля качества профилей и техники безопасности при производстве профилей. Требования разработанных нормативно-технических документов являются обязательными в авиастроении при использовании метода стесненного изгиба.

Технологические маршруты изготовления деталей.

Детали: прямолинейные.	
без подсечек (после правки растяжением в состаренном состоянии)	с подсечками (до правки растяжением в отожженном состоянии)*
1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка и зачистка. 3. Анодирование. 4. Окончательный контроль.	1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка. 3. Закалка. 4. Правка в свежезакаленном состоянии. 5. Подсечка в с/з состоянии. 6. Контроль, доводка, обезжиривание (B95). 7. Старение искусственное (B95) или естественное (1163) 8. Контроль механических свойств и структуры. 9. Отрезка, доводка. 10. Анодирование. 11. Окончательный контроль.
Детали: криволинейные.	
1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка, гибка по контуру, доводка. 3. Отрезка и зачистка торцев. 4. Анодирование. 5. Окончательный контроль.	1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка. 3. Закалка. 4. Правка растяжением и гибка по контуру и доводка. 5. Подсечка и доводка в с/з состоянии. 6. Обезжиривание и старение. 7. Контроль механических свойств и структуры. 8. Отрезка припуска, доводка. 9. Анодирование. 10. Окончательный контроль.
* Допускается исходное состояние – свежезакаленное, при этом операция «3» исключается.	

Выводы по разделу 7

1. Установленная последовательность этапов проектирования позволяет оптимизировать этап технологической подготовки производства с целью обеспечения надлежащего качества профиля и снижения производственных издержек.

2. Выявленные методы оценки технологичности конструкции профиля, требования к ней и методам изготовления профиля позволяют формировать концептуальные решения на стадии технологической подготовки производства:

интенсификация процесса формообразования профиля или создание нового профилировочного оборудования.

3. Расчет параметров угловой зоны и ширины заготовки под стесненный изгиб имеет весьма важное значение как с точки зрения эксплуатационных характеристик профиля, так и с точки зрения реализации самой технологии стесненного изгиба. Геометрические параметры угловой зоны определяются на основе компромисса между несущей способностью по сжимающим нагрузкам и ресурсом по отношению к кручению профиля. Уточненный расчет избытка заготовки позволяет выдержать точную геометрию угловой зоны и избежать разрушений в форме трещин или зажимов.

4. Наличие аксиальных сил сжатия позволяет значительно интенсифицировать процесс с целью получения больших утолщений в угловой зоне, однако реализация переднего подпора в роликах окончательного формообразования имеет серьезные ограничения из-за сил трения, а потому применение переднего подпора целесообразно лишь в весьма специальных случаях.

5. Выбор профилировочного оборудования учитывает не только мощность станка, межосевое расстояние, но и межклетьеовое расстояние и число переходов.

6. Технологическое оснащение процесса изготовления профилей включает оснастку для раскройно-заготовительных операций (дисковые ножи, втулки, эластичные кольца), формующую оснастку (ролики и правильные фильеры), оснастку для отделки профилей (шаберы, зажимные губки).

Замыкание рабочего контура формующих роликов обеспечивается буртами при горизонтальном расположении краевых элементов профиля и уступами при их вертикальном расположении.

7. Первый переход в случае простой конфигурации сечения профиля можно осуществлять за счет направленной потери устойчивости в клетки с вертикальными валами. При значительной номенклатуре профилей с близкими размерами при сходной конфигурации возможно использование сборных роликов. Ось профилирования надлежит располагать преимущественно на уровне центров масс сечений по всем переходам.

8. Изготовление Z-образных профилей с одной прямой полкой можно осуществлять путем формообразования симметричного корытообразного профиля с отбортовками с его последующей продольной разрезкой в условиях поперечного упругого обжатия.

9. При выборе маршрутов изготовления профилей следует предпочитать формообразование профиля и деталей в свежезакаленном состоянии заготовки, поскольку каждая из межоперационных термообработок снижает прочность авиационных сплавов до 10%.

8. ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ

Внедрение оборудования и технологии изготовления профилей связано с решением ряда организационных и технологических проблем, которые рассматриваются ниже в связи с постановкой профилей, изготавливаемых стесненным изгибом, на изделие «114» [3].

8.1. Технические условия на изготавливаемые профили

Технические требования распространяются на гнутые пробилы из листовых материалов марок Б95пчАТ2 и 1163АТ толщиной 0,8; 1,0; 1,2 мм с сечениями, приведенными на рис. 5.1. В изделиях применяются профили в закаленном и состаренном состояниях на стрингерный набор Фюзеляжа и оперения. Каждая партия профилей должна изготавливаться из одной партии листа или лент и одного состояния. Размеры сечения профилей и используемые материалы приведены в табл. 5.1.

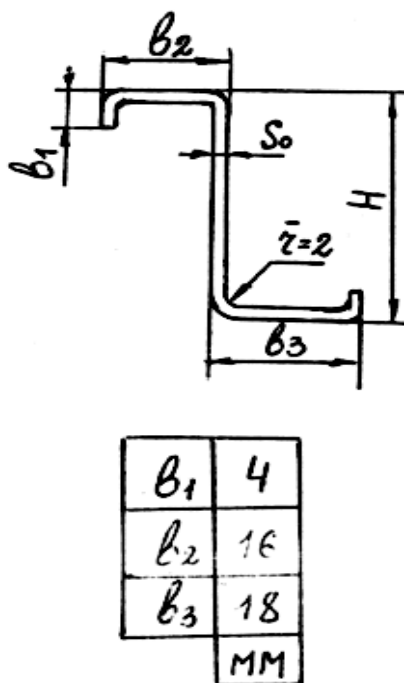


Рис. 8.1. Сечения профилей

Контролю механических свойств (при растяжении) подвергают 100 % листов и 10 % профилей, изготовленных из испытанных листов. После набора статистических данных процент контролируемых профилей и листов уточняется.

Приведенные технические условия на профили были сформулированы ОКБ и переданы для разработки технологии и оборудования для изготовления профилей методом стесненного изгиба на опытные изделия.

Таблица 8.1

Исходные данные для разработки технологии

Номер профиля	Материал	S0, мм	H, мм	Bз, мм
123	B95пчА	1,0	20	54,0
123	1163А	1,0	20	54,0
125	1163А	0,8	20	55,7
127	B95пчА	1,0	25	55,7
128	B95пчА	1,2	25	58,0

Требования к изготавливаемым профилям даны в табл. 5.2.

Таблица 8.2

Контролируемый параметр	Требование	Примечание
1. Прогиб	Не более 1 мм/м	Под грузом 50 Н
2. Скрутка	Не более 1 град.	-----
3. Неровности поверхности в зоне сгиба	Не более 30 мкм	По высоте
4. Отклонения размеров сечения	Не более 0,2 мм	Кроме толщины
5. Допуск на Толщину	В пределах исходного листа; угольковая зона без утонения	РТМ 1.4.1630–86
6. Остаточная деформация	Не более 20 процентов	-----
7. Механические свойства	По ОСТ 190125–83	

8.2. Разработка технологических маршрутов и директивной технологии

Для обеспечения рациональной организации изготовления деталей из профилей, создания специализированных участков групповых технологических процессов и поточных линий, была принята технология изготовления деталей в

два этапа. На первом этапе осуществляли изготовление длинномерных профилей как исходных полуфабрикатов [123], а на втором – деталей из них.

Анализ возможных вариантов технологических маршрутов изготовления профилей позволил выделить два основных [116]: первый, связанный с Формообразованием профиля в свежезакаленном состоянии, и второй, предусматривающий формообразование профиля в отожженном состоянии.

Состав операций технологических маршрутов и их последовательность при изготовлении профилей по вариантам приведены в табл. 5.3. Следует отметить, что второй вариант предпочтительнее первого вследствие того, что он дает больший временный интервал для выполнения последующих операций (гибка, подсечка) в свежезакаленным состоянии. Это и определило выбор его в качестве базового варианта. Применение первого варианта ограничивалось лишь изготовлением деталей длиной более 6 м и в связи с небольшими размерами наличного термического оборудования.

Таблица 8.3

Технологические маршруты изготовления профилей.

Вариант 1: исходное состояние материала – отожжённое (М) или состаренное (Т, Т2)	
Профили без подсечек	Профили с подсечками
1	2
1. Раскрой листа и обезжиривание заготовки. 2. Закалка. 3. Формообразование в свежезакаленном (с/з) состоянии. 4. Правка растяжением в с/з состоянии. 5. Обезжиривание (для сплава В95) и старение искусственное (В95) или естественное (1163) 6. Контроль геометрии, свойств и структуры.	1. Раскрой листа и обезжиривание заготовки. 2. Закалка. 3. Формообразование в свежезакаленном (с/з) состоянии. 6. Контроль геометрии, свойств и структуры.
Вариант 2: исходное состояние материала – отожженное	
1. Раскрой листа. 2. Формообразование. 3. Обезжиривание и смазка. 4. Правка растяжением в с/з состоянии 5. Старение искусственное (В95) или естественное (1163). 6. Контроль геометрии, свойств и структуры.	1. Раскрой листа. 2. Формообразование

Из профилей, полученных по первому или второму вариантам (табл. 5.3) изготавливали детали различной длины четырех типов: прямолинейные (с подсечками или без них) и криволинейные (с подсечками или без них). Технологические маршруты изготовления деталей из профилей приведены в табл. 5.4. [124].

Таблица 8.4.

Технологические маршруты изготовления деталей.

Детали: прямолинейные.	
без подсечек (после правки растяжением в состаренном состоянии)	с подсечками (до правки растяжением в отожженном состоянии)*
1	2
1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка и зачистка. 3. Анодирование. 4. Окончательный контроль.	1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка. 3. Закалка. 4. Правка в свежезакаленном состоянии. 5. Подсечка в с/з состоянии. 6. Контроль, доводка, обезжиривание (B95). 7. Старение искусственное (B95) или естественное (1163) 8. Контроль механических свойств и структуры. 9. Отрезка, доводка. 10. Анодирование. 11. Окончательный контроль.
Детали: криволинейные.	
1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка, гибка по контуру, доводка. 3. Отрезка и зачистка торцев. 4. Анодирование. 5. Окончательный контроль.	1. Контроль внешнего вида и маркировки. 2. Отрезка. 3. Закалка. 4. Правка растяжением и гибка по контуру и доводка. 5. Подсечка и доводка в с/з состоянии. 6. Обезжиривание и старение. 7. Контроль механических свойств и структуры. 8. Отрезка припуска, доводка. 9. Анодирование. 10. Окончательный контроль.
* Допускается исходное состояние – свежезакаленное, при этом операция «З» исключается.	

На основе табл. 5.3 и 5.4 была разработана и передана заказчику директивная технология для подготовки серийного производства.

8.3. Разработка и изготовление технологического оборудования и оснастки

На основе расчётов, выполненных в третьей главе настоящей работы, было сформулировано техническое задание на проектирование станков ГПС–200М, ГПС–200М1, ГПС–200М11, выполнены проектные работы, а также были изготовлены и опробованы все модификации станков (1986 – 1992 г.г.). В каждой последующей модификации устранялись недостатки предшествующей. Изменения, вносимые в каждую из модификаций, были направлены на снижение металлоемкости, уменьшение габаритов, расширение технологических возможностей и удобство в эксплуатации.

Не останавливаясь на особенностях каждой из модификаций, отметим лишь, что, например, модель ГПС–200М1 в сравнении с моделью ГПС–200 имеет массу на 25 % меньше, а габаритные размеры (в плане) на 15 % меньше, что стало возможным после выполнения расчетов силовых параметров и межклетьевого расстояния (см, гл, 3). Последняя модель ГПС–200М11 (рис.5.2) в отличие от других моделей имеет возможность установки нажимного ролика перед клетью окончательного формообразования, а также имеет установленное за правильным блоком устройство извлечения профиля. Кроме того, увеличена производительность станка до 20 м / мин и решена проблема снятия заусенцев при движении профиля в процессе Формообразования. К 1992 г. в отрасли внедрено семь станков семейства ГПС.

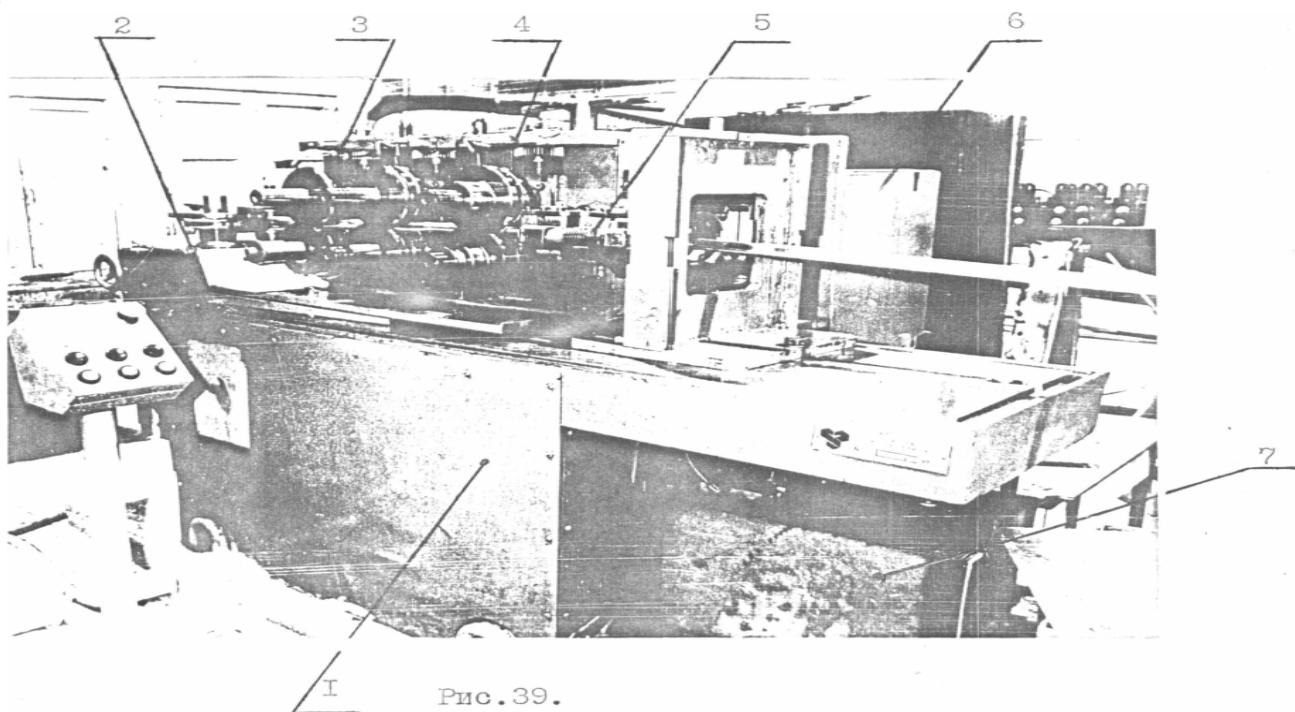


Рис. 5.2. Станок ГПС–200

Используя результаты комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований по получению прямолинейных профилей при формообразовании их стесненным изгибом, было разработано техническое задание на проектирование специализированного оборудования – гибочно-прокатного станка ГПС – 200, ГПС – 200М, ГПС – 200М1.

Конструкторская документация на эту группу станков разработана НИЛ – 8510 НИАТ. Станки изготовлены на Ульяновском станкостроительном заводе и эксплуатируются на ММЗ им. С. В. Ильюшина, Ферганском механическом заводе и других предприятиях отрасли.

Станок ГПС – 200М, фото – рис. 39, состоит из станины 1, клетки предварительного формообразования 2, профилирующих клеток 3, 4, устройства для правки профилей 5, привода 6, станции смазки 7 .

Устройство для правки профилей старка разработано и изготовлено на основании результатов данной работы.

Конструкция устройства защищена авторскими свидетельствами на изобретения [25], [26].

При использовании этого устройства в очаге деформации создаются условия формообразования прямолинейного профиля.

Применение разработанного, исследованного и внедренного в производство правильного устройства [25], [26] позволяет обеспечить:

- формообразование профилей больших длин методом стесненного изгиба гибкой – прокаткой с поводами пределах 1 – 3 мм/м;
- повышение качества профилей и ликвидации брака от значительных поводов;
- стабилизирование процесса стесненного изгиба при гибке – прокатке, обеспечивая тем самым точность поперечного сечения профиля по длине;
- снижение трудоемкости изготовления профилей за счет снижения затрат на правку;
- простоту изготовления, наладки и работы;
- возможность встраивать гибочно-прокатный станок в линию по изготовлению профилей.

Для качественной работы правильного устройства и получения прямолинейного профиля при изготовлении обеспечено следующее:

- конструкция клеток гибочно-прокатного станка выполнена достаточно жесткой, воспринимающей распирающие усилия при формообразовании профилей из алюминиевых сплавов при толщине заготовки до 2,5 мм без изменения более чем на 0,03 мм расстояния между валами;
- межклетьеовое расстояние (расстояние между осями, соединяющими центры валов двух соседних клеток) выполнено минимальными, во избежание значительных отклонений направления движения заготовки и составляет 220 мм;

- межцентровое расстояние валов одной клетки выполнено регулируемым. Это необходимо для настройки оси профилирования в вертикальной плоскости. Валы каждой клетки параллельны между собой и валами остальных клеток в пределах $\pm 0,1$ мм во избежание перекоса линии профилирования. Размеры и конструкция формующих валков обеспечивают постоянство зазоров между ними и учитывают условия прямолинейности получаемых профилей в соответствии с разработанными рекомендациями (см. стр. 110). Станок содержит направляющее устройство для симметричной подачи плоской заготовки в формующие ролики;

- предусмотрена система, обеспечивающая равномерную смазку формующих верхних и нижних роликов и удаляющая с них различные посторонние включения (остатки ветоши, стружки металла, от заготовок, избыток смазки и т. д.);

- отклонение оси профилирования от прямолинейности (по центрам жесткости сечений заготовки) обеспечивается в пределах $\pm 0,5$ мм;

- отклонение ширины развертки заготовок по длине не более $\pm 0,25$ мм;

- точность изготовления роликов предварительных переходов в пределах 9 ÷ 11 квалитетов, окончательных – 7 – 8 квалитетов, частота поверхности $R_a 0,63 \div 0,32$;

- точность изготовления правильной оснастки в пределах 9 – 11 квалитетов, шероховатость правильных калибров $R_a 0,32$.

Режимы формообразования профилей разрабатывались применительно к листовым плакированным заготовкам сплавов Д16, В95, 1163 в свежезакаленном и отожженном состояниях, и листовым заготовкам сплавов 1420, 01450 различных модификаций в состоянии Т.

Толщина заготовок от 0,8 до 2,5 мм. Типовой технологический процесс был разработан применительно к использованию гибочно-прокатных станков типа ГПС – 200, ГПС – 200М, предназначенных для изготовления длинномерных профилей стесненным изгибом.

Получаемые профили – типа стрингеров, длиной до 8000 мм. Разработанные технологические маршруты представлены в таблице 18. На основании этих технологических маршрутов разработан директивный технологический процесс изготовления листовых профилей (УНО – 123 ... 128) и деталей из них изделия 114 (см. Приложение). Технологические режимы изготовления согласованы с ВИАМ, НИАТ и отражены в соответствующих отраслевых технологических рекомендациях [55],[56].

Таблица 18

Технологические маршруты изготовления профилей с обеспечением прямолинейности в очаге стесненного изгиба

№№	Технологические маршруты по материалам
----	--

пп	1463М, Д16М, В95М	1463, Д16, В95 в свежезакален. сост.	1420, 1450
1	Раскрой листа на полосы	Раскрой листа на полосы	Раскрой листа на полосы
2	Формообразование профиля 20%	Закалка полос	Формообразование профиля
3	Закалка	Формообразование профиля в свежезакаленном состоянии 20%	Закалка
4	Правка растяжением 2%	Контроль	Правка растяжением
5	Контроль	—	Контроль

8.4. Применение разработанного правильного устройства

Большое количество экспериментальных работ по формообразованию гибкой – прокаткой стесненным изгибом прямолинейных профилей различных форм и размеров поперечного сечения позволило обнаружить некоторую зависимость между конфигурацией, размерами профиля и его поводками. Для раскрытия этой зависимости были систематизированы результаты проводимых в различное время предварительных настроечных работ гибочно-прокатных станков стесненного изгиба без применения правильного устройства. Результаты экспериментов сведены в таблицу 19. Анализируя данные, приведенные в таблице можно сделать вывод, что величина поводок профилей при формообразовании их на гибочно-прокатных станках стесненного изгиба прямо пропорционально зависит от соотношения габаритных размеров профиля и количества зон сгиба. Обозначим отношение суммы габаритных размеров профиля к количеству зон сгиба – K , и в зависимости от этого коэффициента расположим исследуемые профили (таблица 19) .

Таблица показывает величину коэффициента K для различного вида профилей. По данным таблицы построена графическая зависимость – рис. 40. Исходя из данных таблицы и рис. 40 можно сказать, что профили имеющие коэффициент K меньший по величине 20 – 25 обязательно требуют при формообразовании применения специального правильного устройства, предупреждающего поводок.

Как показывает анализ конструкции каркасов современных летательных аппаратов, такого вида профили занимают значительную часть конструкций.

Таблица 19

Зависимость поволоок профиля от коэффициента К

№ № пп	Эскиз профиля	$K = \frac{B+H}{n}$	Мах поводки
1	2	3	4
1		$K = \frac{16+18+25}{4} = 15$	до 100 мм/м
2		$K = \frac{16+18+20}{4} = 13,5$	до 100 мм/м
3		$K = \frac{40+17}{4} = 13,75$	до 180 мм/м
4		$K = \frac{52+20}{4} = 18$	до 50 мм/м
5		$K = \frac{52+25}{4} = 19$	до 50 мм/м
6		$K = \frac{54+30}{6} = 14$	до 100 мм/м

Продолжение табл.19

1	2	3	4
7		$K = \frac{75+35}{6} = 17,5$	до 80 мм/м
8		$K = \frac{90+50}{4} = 35$	менее 10 мм/м
9		$K = \frac{23+14}{2} = 18,5$	до 80 мм/м

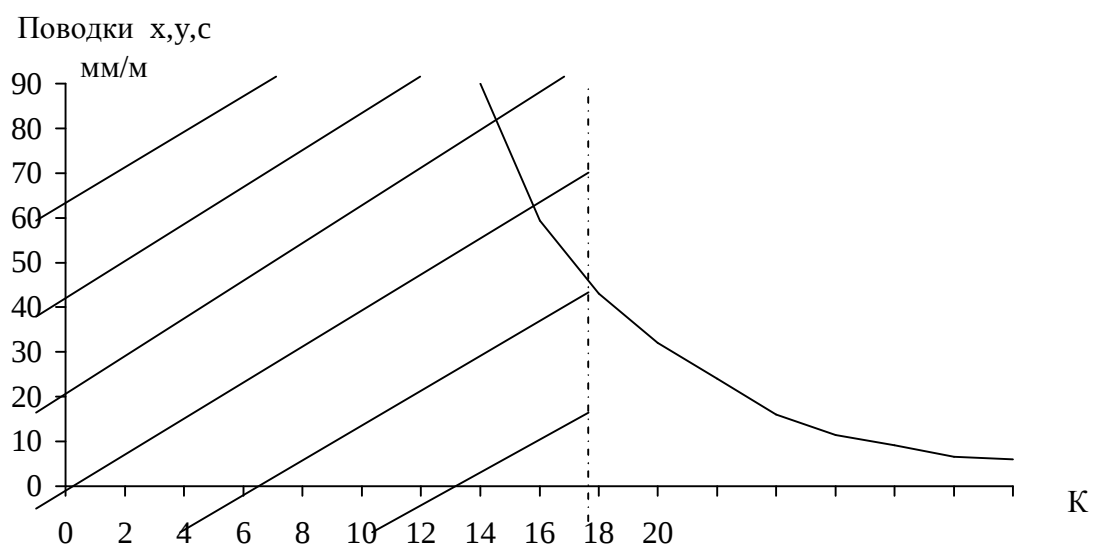


Рис.40. Зависимость поводок профилей от коэффициента К:

 $K > 20$ – зона обязательного применения правильного специального устройства

Для раскроя и подрезки в размер заготовки вместе со станками ГПС были также поставлены раскройные станки ДИН–300.

Для осуществления технологического процесса изготовления профилей была разработана и изготовлена технологическая оснастка под сечения, изображенные на рис. 5.1 (табл. 6.1), в соответствии с рекомендациями и требованиями, изложенными в четвертой главе настоящей работы.

Что касается оснастки для выполнения подсечек и гибки, то требования к инструменту и другие необходимые, данные, изложенные в работах [124, 125, 126], были приняты за основу при проектировании и изготовлении соответствующего инструмента и выборе надлежащего оборудования,

В работе [125] из рассмотрения нескольких схем выполнения односторонней подсечки в закрытых штампах выявлено, что наиболее благоприятней является схема Формообразования сдвигом с осадкой (рис. 5.3). Для неё определено, что максимальная деформация ε_t при подсечке определяется Формулой:

$$e_t = \frac{1,926 - 1,141\overline{h_f}}{1,571\overline{r_b} + 2,675\overline{h_f} - 1,890}$$

Пружинение полки Δh после подсечки определяется формулой:

$$\Delta h = \Delta h_0 + \Delta h_c + \Delta h_n,$$

где Δh_0 , Δh_c , Δh_n определяются из рис. 5.4, 5.5, 5.6 соответственно. При проектировании оснастки (рис. 5.3) на матрице и на пуансоне были выполнены уклоны, исходя из формулы (5.1), для компенсации пружинения ($\Delta h=0,2-0,6$ мм).

Усилие подсечки P складывается из силы $P_{уг}$, потребной для осадки уголкового участка и ее переформовки; силы калибровки P_k , необходимой для выпрямления ранее согнутого участка полки вблизи уголкового участка; силы P_c , потребной для Формообразования зоны сгиба; силы прижима заготовки P_n :

$$P = P_{уг} + P_k + P_c + P_n. \quad (5.2)$$

Значения величин, входящих в правую часть уравнения (5.2), даны в работе [126]. Формула для вычисления усилия (5.2) была использована при выборе оборудования и расчета параметров буфера прижима.

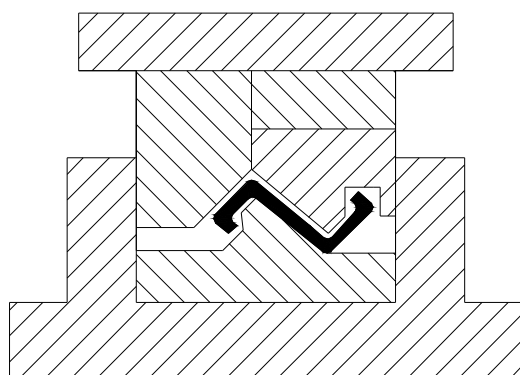


Рис. 5.3. Штамп для подсечки профилей

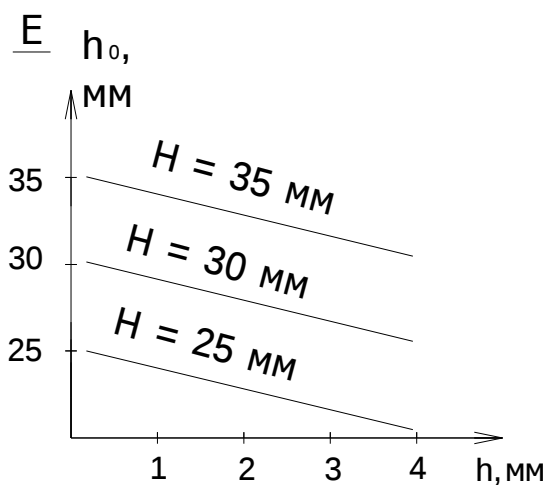


Рис. 5.4. Пружинение стенки

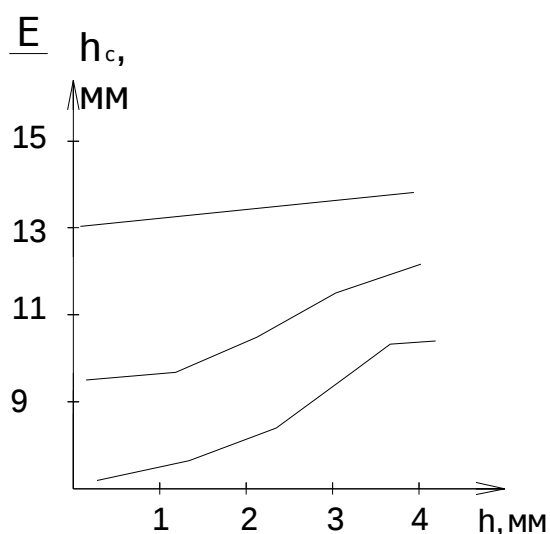


Рис. 5.5. Пружинение участка сбега

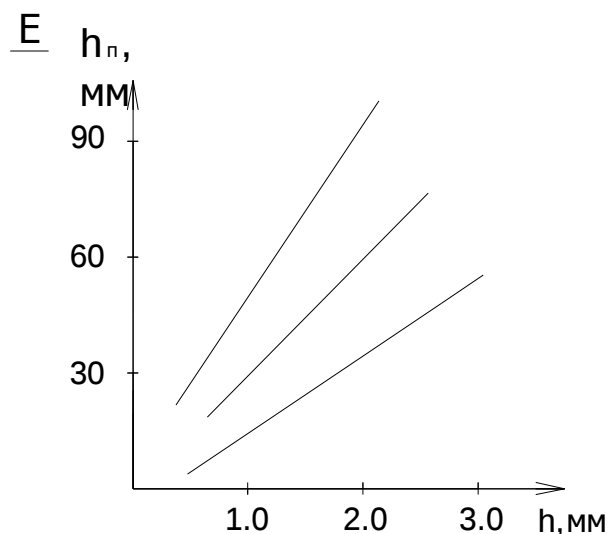


Рис. 5.6. Упругая отдача уголковой зоны

8.5. Освоение оборудования и технологии.

В процессе опытной эксплуатации станка ГПС–200М были выявлены и устранены следующие недостатки. Так, одновременно с отработкой технологии был изготовлен переносной пульт управления станком, обеспечена подачей и сбором смазки клеть предварительного формообразования, увеличен объем масляного ба-

ка, доработаны углы регулировки клеток предварительного и окончательного формообразования, а также правильного блока; приведены в соответствие межосевые расстояния роликов и накидных серег за счет доработки последних. Кроме того, внесены предложения по модернизации станка для серийного производства, в частности, предложено спроектировать направляющее устройство с регулируемым углом наклона, устройство для удаления профиля из правильного блока, устройство для снятия заусенцев в процессе профилирования, а также систему жидкой смазки шестерных клеток. Все предложения были впоследствии реализованы при разработке станков ГПС–200М1 и ГПС–200М11 для серийного производства.

При выборе режимов формообразования исходили из требований к изготавливаемым профилям (табл.5.2). Так как существуют ограничения по величине остаточных деформаций и условие отсутствия утонения, то во избежание больших (более 20 %) деформации вблизи внутреннего контура был выбран режим, при котором утолщение в зоне сгиба составляло 3–5 %. При этом качество поверхности профиля не ухудшалось. Величины усилия переднего поджатия не превышали 300–600 Н. При этом зазоры в правильных фильерах были увеличены на 0,2 – 0,1 мм по отношению к номинальной толщине профиля. Зазоры в роликах окончательного Формообразования выбирались, из условия компенсации упругих деформаций элементов клетки. По выбранному режиму были изготовлены партии профилей, которые были переданы ВИАМ и ЦАГИ для последующих испытаний (рис. 5.7).

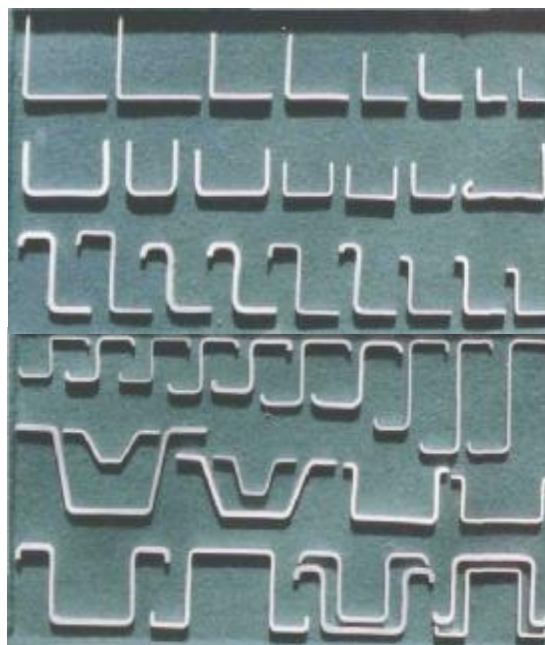


Рис. 10 (5.7). Профили из алюминиевых сплавов, изготовленные методом СИ, и применяемые в авиастроении

8.6. Характеристики профилей.

8.5.1. Оценку точности размеров поперечного сечения изготавливаемых профилей производили измерением (объем выборки – 5–7 штук от партии одного наименования) с помощью штангенциркуля (точность измерения $\pm 0,02$ мм), ра-

диусомера и оптического микроскопа (измерение утолщений). Результаты измерений после их статистической обработки приведены в табл. 5.5.

Как видно из табл. 5.5, профили удовлетворяли требованиям ОКБ по размерам поперечного сечения (см. табл. 5.2). Другие геометрические характеристики из табл. 5.2 также находились в заданных пределах.

Таблица 5.5.

Геометрия сечений профилей.

Номер профиля	H, мм max min	b1	b2	b3	r	($\eta\phi-1$)*100%
123	$\frac{20,2}{19,8}$	4,1	16,1	18,0	2,0	3,5
124	$\frac{20,1}{19,8}$	4,0	16,1	18,0	2,0	4,3
125	$\frac{20,1}{19,8}$	3,8	16,0	18,0	1,8	5,0
127	$\frac{25,2}{24,8}$	4,0	16,0	18,1	1,9	3,0
128	$\frac{25,2}{25,0}$	4,2	16,0	18,1	2,6	5,0

5.5.2. Механические свойства определялись на образцах, вырезанных из полок и стенок профилей. Испытания проводили на разрывной машине «Инстрон» с записью диаграммы нагружения при скорости перемещения захватов 10 мм/мин и шкале нагрузок до 5000 Н. Результаты испытаний в виде усредненных характеристик (по пять образцов на точку) приведены в табл. 5.6. Сопоставление действительных значений прочностных характеристик профилей с требованиями ОСТ указывает на их удовлетворительное соответствие. Испытания образцов длиной 88–100 мм на местную потерю устойчивости проводили на испытательной машине FP 100/1 с записью диаграммы при скорости нагружения 0,05 мм/с. Результаты испытаний приведены в табл. 5.7 и свидетельствуют о довольно высоком уровне механических свойств профилей.

5.5.3. Исследования поверхностного слоя на изготовленных профилях показали, что нарушений (типа задиров, царапин, микротрещин, отслоений, зажимов и т. п.) не обнаружено. Наблюдаются небольшие утолщения по зонам сгиба до 5 %, полкам – до 2 %, торцам – до 5 %..

Структуру профилей исследовали на шлифах методами оптической металлографии. Результаты исследований приведены в табл. 5.8. Неравномерность зерна (особенно для сплава 1163) имеет место вблизи контуров зоны сгиба (рис. 5.8) и на торцах отбортовок. Для профилей с подсечками характерно смещение зоны укрупненного зерна на прямолинейный участок полки, что связано с перестройкой зоны сгиба.

Таблица 5.6.

Механические свойства материала профилей

Номер профиля	*Элемент профиля	Значения по элементам			Значения по профилю			Нормы по ОСТ 190125–83
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	ε , %	σ_B , МПа	σ_T , МПа	ε , %	
124	Н	440	308	17,6	421	305	16,9	$\sigma_B \geq 415$ МПа $\sigma_T \geq 275$ МПа $\delta \geq 13$ % (1163АТ)
	В	428	309	16,6				
	С	396	297	16,4				
125	Н	441	323	16,0	443	325	18,6	
	В	445	321	20,0				
	С	442	331	19,7				
123	Н	483	392	10,7	480	392	11,0	$\sigma_B = 460\text{--}540$ МПа $\sigma_T = 390\text{--}470$ МПа $\delta \geq 8$ % (В95пчТ2)
	В	485	382	11,9				
	С	473	401	10,4				
127	Н	495	410	10,5	493	397	10,7	
	В	481	356	9,5				
	С	503	426	12,0				
128	Н	475	394	10,7	482	405	10,6	
	В	480	401	10,8				
	С	492	421	10,4				

* Н – нижняя полка; В – верхняя полка; С – стенка.

Таблица 5.7.

Испытания профилей на местную потерю устойчивости.

Номер профиля	Высота образца, мм	Площадь сечения, мм	$\sigma_{кр}$, МПа	$\sigma_{кр}/\sigma_T$
123	100	54,0	354	0,90
124	100	54,0	214	0,70
125	80	44,6	176	0,55
127	100	59,7	297	0,75
128	100	69,6	345	0,85

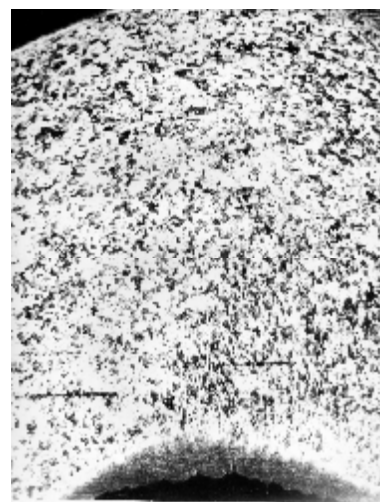


Рис. 5.8. Микрошлиф зоны сгиба профиля

Рис. 5.8. Структура профилей

5.5.4. Проведенные в ВИАМ коррозионные испытания образцов профилей на расслаивающую и межкристаллитную коррозию показали, что межкристаллитная коррозия отсутствует, а степень расслаивающей коррозии профилей с удаленной травлением плакировкой не превышает 4 баллов для всех режимов изготовления профилей, что примерно соответствует характеристикам исходного листа.

5.5.5. Определение сопротивления малоциклового усталости профилей в ВИАМ и ЦАГИ на образцах длиной 300 мм осуществлялось на основе осевого циклического растяжения ($\sigma_{max} = 160$ МПа, $\sigma_{min} = 0$, $\nu = 6$ Гц) на машине MTS. Разрушение образцов происходило при числе циклов $N = (140-240)10^3$ циклов.



Рис. 4. 24. Микронеровности и зажимы на внутреннем контуре

Структура материала профилей

Элементы профиля	Структура, зернистость (балл по ГОСТ 21037.1–75/диаметр, мкм)				
	В95пчАТ2			1163АТ	
	123	127	128	124	125
Стенка, верхняя полка	Р/М, 4/18	Р/М, 3–4/88–125	Р/М, 6–7/31–44	Р/М, 3–4/88–125	Р/М, 5–6/44–62
Нижняя полка	М/У, 3–4/88–125	У/У, 2–3/125–177	Р/М, 5–6/44–62	Р/М, 3–4/88–125	Р/М, 3–4/88–125
Зоны сгиба	М/У, 3–4/88–125	У/У, 2–3/125–177	Р/М, 5–6/44–62	У/У, 2–3/125–177	К 1–2/ до 500
Торцы	М/У, 3–4/88–125	У/У, 2–4/88–177	Р/М, 5–6/44–62	У/У, 3/125	К 1–4/88–250

Обозначения: Р/М – равномерная мелкозернистая структура;

М/У – мелкозернистая с участками укрупненного зерна;

У/У – с участками укрупненного зерна;

К – с участками крупного зерна.

8.7. Разработка нормативно – технической документации.

Достиженные научные и практические результаты в части изготовления профилей и деталей из них закреплены в нормативно–технической документации [109, 115, 116, 121, 124], а также в директивном технологическом процессе (приложение 1). В указанных документах отражены все вопросы проектирования и изготовления оснастки, настройки оборудования, контроля качества профилей и техники безопасности при производстве профилей. Требования разработанных нормативно-технических документов являются обязательными в авиастроении при использовании метода стесненного изгиба.

Выводы по разделу 8

5.7.1. Для опытного и серийного производства разработаны технологические маршруты, предусматривающие два этапа: изготовление профилей и изготовление деталей. При этом изготовление профилей может производиться по двум маршрутам: из свежезакаленного или из отожженного материала. Второй маршрут является более предпочтительным из-за наличия большего временного промежутка для выполнения подсечек и гибки по контуру.

5.7.2. Разработаны, изготовлены и внедрены в опытное и серийное производство станки ГПС–200М1 и ГПС–200М11, а также технологическая оснастка для изготовления зетобразных профилей. Отработаны режимы формообразования. В частности, из-за роста зерна после термообработки пришлось ограничиться небольшими утолщениями зон сгиба (до 5 %).

5.7.3. Для выполнения односторонних подсечек профилей найдена оптимальная схема Формообразования, предусматривающая совмещение сдвига и осадки. Для указанной схемы определены усилия формозобразования, величины пружинения и максимальные остаточные деформации.

5.7.4. Получаемые по разработанной технологии профили по своим геометрическим, механическим, коррозионным и другим характеристикам удовлетворяют требованиям ОКБ и отраслевой нормативно-технической документации.

5.7.5. Разработаны отраслевые нормативно-технические документы в составе методических материалов, технологических рекомендаций, руководящего технического материала, директивного технологического процесса, которые утверждены НИАТ и БИАМ и действуют на настоящий момент в отрасли.

1. На базе результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований по получению прямолинейных профилей создано специализированное оборудование – гибочно-прокатный станок ГПС – 200М, содержащий правильное устройство, конструкция которого защищена авторским свидетельством на изобретение [26].

2. Эксплуатация станка ГПС – 200М на ММЗ им. С. В. Ильюшина и ФМЗ показала его высокую производительность и качество работы.

Получаемые профили соответствуют технологическим требованиям заказчика и применяются в издании 114.

3. Разработаны и внедрены в опытном и серийном производствах технология и оборудование для получения прямолинейных профилей методом стесненного изгиба гибкой – прокаткой.

4. Определена область применения правильного специального устройства при формообразовании профилей методом стесненного изгиба.

5. Разработана и внедрена специализированная конструкция формирующей оснастки, обеспечивающая заданное качество и прямолинейность профилей.

9. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА

9.1. Экономический эффект от внедрения технологии и оборудования

Преимущества использования в конструкциях летательных аппаратов листовых профилей из плакированных материалов достаточно широко известны [6]. Наличие малых радиусов и отсутствие утонения в зоне сгиба в случае изготовления их методом стесненного изгиба делает эти профили необходимыми для высокоресурсных самолетов.

В приложении 2 даются расчеты экономической эффективности внедрения оборудования и технологии изготовления длинномерных профилей методом стесненного изгиба в роликах на предприятиях п/я Р-6327 и п/я Р-6314. Экономический эффект от внедрения составляет более тыс. руб.

Экономический эффект рассчитан в сравнении с существующим технологическим процессом изготовления тонкостенных профилей из прессованных методом размерного травления. Указанный процесс выбран в качестве аналога в связи с тем, что травлением достигается высокое качество поверхности, приближающееся к свойствам плакирующего слоя в отношении коррозионной стойкости с одной стороны, а также в связи с невозможностью получения прессованием профилей из высокопрочных материалов с толщиной стенок менее одного миллиметра, с другой. Кроме того, прессованные профили не имеют плакирующего слоя.

Экономическая эффективность подтверждена актами внедрения.

Преимущества, которые дает применение в конструкциях изделий машиностроения листовых профилей повышенной жесткости, достаточно широко описаны в литературе [8, 19, 31, 45].

В приложении (Приложение 2) приведены расчеты экономической эффективности внедрения технологии изготовления длинномерных профилей методом стесненного изгиба на предприятиях п/я Р – 6327, п/я Р – 6314. Экономический эффект по этим предприятиям превышает 250 тысяч рублей.

Длина деталей из профилей, применяемых в изделиях данных предприятия, достигает 6000 мм.

Получение профилей длиной до 8000 мм методом стесненного изгиба гибкой – прокаткой производится на станках типа ГПС – 200М, в конструкциях которых и применяемой технологии использованы результаты проведенных исследований.

Экономический эффект рассчитан в сравнении с существующим технологическим процессом изготовления тонкостенных профилей из прессованных методом размерного травления, в связи с отсутствием прессованных профилей из перспективных алюминиевых сплавов с толщиной стенок менее 1,2 мм.

Сравнения проведены из расчета работы одного станка ГПС – 200М, при изготовлении всей номенклатуры профилей для серийного и опытного выпуска изделий. Увеличение программы выпуска изделий позволит, соответственно, увеличить экономический эффект от внедрения результатов исследований.

Длинномерные профили, получаемые из листовых заготовок методом стесненного изгиба гибкой – прокаткой с обеспечением прямолинейности в очаге стесненного изгиба могут найти дополнительно широкое применение в конструкциях легковых и грузовых автомобилей, судостроении, строительстве и других отраслях машиностроения. Причем, во многих случаях без применения дополнительных отделочных операций правки.

9.2. Техничко-экономические показатели применения гнутых из листа профилей

Расчёт технологической себестоимости изготовления формующего инструмента.

Формообразование профилей осуществляется на станке ГПС-500М6. Для раскроя заготовок требуемой ширины из стандартных листов (6000х1250) используются дисковые ножницы ДИН-1500.

Технологическая себестоимость C_t комплекта формующего инструмента определяется формулой: $C_t = C_m + C_p + C_0 + C_3 + C_{тт}$.

Стоимость основных материалов (9ХС) $C_t = 2000$ руб.

Заработная плата производственных рабочих $C_p = (K_d \cdot T_{шт} \cdot Ч_c)$, для чего необходимо определить штучно-калькуляционное время $T_{шт}$ изготовления комплекта роликов (6 пар): $T_{шт} = T_{ток} + T_{долб} + T_{кал} + T_{шлиф} + T_{отр}$,

$T_{ток} = 60$ часов, $T_{долб} = 8$ часов, $T_{кал} = 10$ часов, $T_{шлиф} = 8$ часов, $T_{дор} = 14$ часов. $T_{шт} = 100$ часов.

Часовую ставку $Ч_c$ примем применительно к среднему разряду работы (четвёртому) при изготовлении роликов. Коэффициент доплат и начислений $K_d = 1,57$; $Ч_{ср} = (22+18)/2 = 20$ руб/час.

$C_p = 1,57 \cdot 100 \cdot 20 = 3140$ руб.

Расходы, связанные с содержанием и ремонтом оборудования C_0 составляют 0,107 от стоимости изготовления роликов. Расходы на оплату использования энергии C_3 составляют 1,0 руб за один кВт.час. Значения затрат на топливо технологическое $C_{тт}$ предусматривает включение сюда и затрат на сжатый воздух; 4,8 руб.

Тогда после учёта всех данных подведём окончательный результат себестоимости изготовления роликового инструмента:

C_m – стоимость основных материалов – 2000р.; C_p – заработная плата рабочих – 3140 р.; C_0 – затраты на содержание оборудования – 200 р.; C_3 – стоимость электроэнергии по объёму выполнения полного технологического процесса изготовления – 100 час · 3 кВт · 1 р/ кВт.час = 300р.; $C_{тт}$ – затраты на технологическое топливо и т.п. составляют 100 · 4,8 р = 480р .

Тогда $C_t = 2000 + 3140 + 200 + 300 + 480 = 6120$ руб.

Для дальнейшего расчёта изготовления отдельных деталей установки воспользуемся выше приведённой методикой и цифровыми данными, которыми мы обладаем.

Расчёт годового **экономического эффекта** при производстве профилей.

Расчёт произведён на основе "Отраслевой методике по определению экономической эффективности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений" ММ 1.4.1153.1983. Основным фактор, определяющий технико-экономическую эффективность - снижение массы изделия за счёт применения материала с меньшей массовой плотностью, изменение конструкции профиля при повышении механических свойств, использование нового оборудования. В работе использованы следующие нормативные данные:

Часовая тарифная ставка производственных рабочих $Ч_{с\text{ раб}} = 20$ руб. Коэффициент использования энергоустановок по мощности и времени $к_{исп} = 0,5$; $к_{исп\text{ вр}} = 0,5$. Стоимость 1 кВт/час электроэнергии $Ц_{э.э.} = 1,0$ руб. Норма отчислений на амортизацию оборудования $A_0 = 0,107$. Норма затрат на ремонт и содержание оборудования принята среднестатистической $Ц_{р.с.о.} = 0,109$.

Принято, что прессованные профили для поставки на изделие проходят фрезерование, химическое травление для получения полок, стенок заданной ширины и толщины. При этом использованы следующие нормативные документы:

Прейскурант 02-10 "Оптовые цены на прокат лёгких и цветных металлов". ОСТ 190070-72 с изменениями 1-4. ОСТ 190040-72 с изменением ГОСТ 8617-75. ТУ 1-9-319-72 с изменениями 1,2. Производственная инструкция ПИ 12.097-78 "Размерное травление алюминиевых сплавов". Прейскурант 05-01 "Оптовые цены на химические реактивы".

При расчёте трудоёмкости изготовления профилей берём скорость профилирования на ГПС-500М6 равной 10 м/мин, заготовки из рулонной ленты $l_3 = 7$ м. Суммарная длина профилей входящих в 1 комплект на изделие АН-70:

1. Профиль ПЛ-101 из сплава Д16чАМ (см. рис.4.47.а) = 900 м.п.;
2. Профиль ПЛ-201 из сплава В95пчАМ (см. рис. 4.47.б) = 500 м.п.;

На партию профилей при годовой программе 12 самолётов АН-70 время профилирования будет равно:

$$T_{г\text{лд гн}} = 12 \text{ сам} \cdot (900+500)/10 = 1680 \text{ мин.}$$

С учётом времени настройки потребуется 2020 мин или 33,6 часов.

Трудоёмкость правки, обесчки прессованных профилей, фрезерование полок по ранее проведённым расчётам (для Ташкентского завода им. В.П. Чкалова) на каждый профиль длиной 6 м составил 0,9 часа. На годовую программу 2875 профилей время получения прессованных профилей

$$T_{г\text{од пр}} = 2875 \cdot 0,9 = 2587,5 \text{ часов.}$$

К ценам до 30.03.91 будем применять в расчётах в связи повышением поправочный коэффициент $k = 15$.

По разработанным руководящим материалам, например РТМ 1603-79 НИИСУ С.32 экономический эффект от снижения массы конструкции на 1 кг составляет 300 руб. его также принимаем увеличенным в 15 раз. Исходные данные для расчёта приведены в таблице 4.6. Произведём расчёт технико-экономических показателей:

1. Расчётное количество оборудования:

$$n_{пр} = \frac{T_{год.пр}}{\Phi_0} = \frac{2875,5}{4015} = 0,72 \text{ единиц}; \quad n_{гн} = \frac{T_{год.гн}}{\Phi_0} = \frac{33,6}{4015} = 0,008 \text{ единиц.}$$

2. Принятое количество оборудования: $n_{пр}=1$ единица, $n_{гн}=1$ единица.

3. Капитальные вложения в оборудование:

$$K_{0 пр} = C_{0 пр} \cdot n_{пр} = 3540 \text{ т.руб.}; \quad K_{0 гн} = C_{0 гн} \cdot n_{гн} = 1900 \text{ т.руб.}$$

Расчёт себестоимости изготовления комплекта профилей:

1. заработная плата производственных рабочих:

$$З_{пр} = ч_{с раб} \cdot T_{год пр} = 51,75 \text{ т.руб.}; \quad З_{гн} = ч_{с раб} \cdot T_{год гн} = 672 \text{ руб.}$$

2. Расход на ремонт и содержание оборудования:

$$P_{о пр} = k_{о пр} \cdot C_{р.с.о} = 381,5 \text{ т.руб.}; \quad P_{о гн} = k_{о гн} \cdot C_{р.с.о} = 207,1 \text{ т.руб.}$$

3. Расход на амортизацию:

$$P_{А пр} = k_{о пр} \cdot A_0 = 374,5 \text{ т.руб.}; \quad P_{А гн} = k_{о гн} \cdot A_0 = 203,3 \text{ т.руб.}$$

4. Расход на электроэнергию двигателей:

$$P_{эл.дв. пр} = N_{э пр} \cdot C_{э.э.} \cdot T_{год пр} = 326,03 \text{ т.руб.}; \quad P_{эл.дв. гн} = N_{э гн} \cdot C_{э.э.} \cdot T_{год гн} = 604 \text{ руб.}$$

5. Расход на материалы:

$$P_{мат. пр} = P_{1 пр} \cdot C_{м. пр} = 261,94 \text{ т.руб.}; \quad P_{мат. гн} = P_{1 гн} \cdot C_{м. гн} = 412,5 \text{ т.руб.}$$

6. Технологическая себестоимость:

$$C_{т пр} = З_{пр} + P_{о пр} + P_{А пр} + P_{эл.дв. пр} + P_{мат пр} = 1395,715 \text{ т.руб.}$$

$$C_{т гн} = З_{гн} + P_{о гн} + P_{А гн} + P_{эл.дв. гн} + P_{мат гн} = 824,176 \text{ т.руб.}$$

результаты технико-экономических показателей сведены в таблицу 4.7.

Экономия в сфере производства: $\mathcal{E}_{пр} = C_{т пр} - C_{т гн} = 571,539 \text{ т.руб.}$

Экономия от снижения массы профилей в ходе эксплуатации (годовой выпуск): $\mathcal{E}_м = C_k \cdot (M_{пр} - M_{гн}) = 0 \text{ руб.}$

Годовой экономический эффект от использования профилей:

$$\mathcal{E}_{г.проф} = \mathcal{E}_{пр} + \mathcal{E}_м = 571,539 \text{ т.руб.}$$

Таблица 4.6. Исходные данные для расчёта

Наименование исходных данных	Усл. обоз.	Ед. изм.	Пресс. профили	Гнутые СИ профили
------------------------------	------------	----------	----------------	-------------------

Примечание [AP1]: Номер табл

1. Годовая программа	N	шт	25	25
2. Площадь сечения профиля	З	мм ²	54,0	54,0
3.Трудоёмкость изготовления	T	н-ч	2587,5	33,6
4. Стоимость 1 кг материала	Ц _м	руб	70	150
5.Коэффициент использования материала	ким		0,70	0,95
6. Расход материала	P	кг	3742	2750
7. Масса профилей	M	кг	2620	2620
8.Балансовая стоимость оборудования	Ц _о	т.руб	3500	1900
9.Годовой фонд времени работы оборудования	Ф _о	час	4015	4015
10.Суммарная мощность энергоустановок	N _э	кВт	126	18
11.Нормативный эффект от снижения массы 1 кг	C _к	руб	-	-

Таблица 4.7. Результаты технико-экономических расчётов

Наименование показателей	Ед. изм.	Усл. обозн.	Пресс. профил и	Гнутые СИ профили
1. Расчёт капиталовложений и единовременно решаемых задач				
1.1.Расчётное количество оборудования	ед.	n	0,72	0,008
1.2.Принятое количество оборудования	ед.	n	1	1
1.3.Капитальное вложение в оборудование	т. руб	к _о	3500	1900
2. Расчёт себестоимости изготовления комплекта профилей				
2.1.Заработная плата производственных рабочих	т. руб	З _о	51,75	0,672
2.2.Расходы на ремонт и содержание оборудования	т. руб	P _о	381,5	207,1
2.3.Расход на амортизацию	т. руб	P _A	374,5	203,3
2.4.Расход на электроэнергию двигателей	т. руб	P _{эл.дв.}	326,025	0,604
2.5.Расход на материалы	т. руб	P _{мат}	261,94	412,5
2.6.Технологическая себестоимость	т. руб	C _T	1395,72	824,176

Экономическая эффективность от внедрения оборудования и технологии.

Годовой экономический эффект от использования нового оборудования в общем случае определяется по разности приведенных затрат:

$$\mathcal{E} = (C_1 + EK_1)P_1 - (C_2 + EK_2)P_2,$$

где C_1 и C_2 - себестоимость единицы продукции соответственно по старому и новому вариантам, руб.; E - коэффициент экономической эффективности капитальных вложений (0,15); K_1 и K_2 - удельные капитальные вложения по вариантам, руб.; P_1 и P_2 - годовой объем продукции соответственно по старому и новому вариантам.

При годовой программе выпуска 12 самолетов АН-70 экономический эффект составит - $\mathcal{E} = 811, 575$ т.руб.

Таким образом, экономические расчеты показали, что окупаемость оборудования выполняется менее чем за 1,5 года при минимальных партиях профилей 100.000 погонных метров.

9.3. Перспективы развития технологии стесненного изгиба

Дальнейшее развитие технологии стесненного изгиба должно идти по пути освоения формообразования профилей с заданной продольной кривизной с применением нажимного ролика [106] или специального правильного устройства [107], а также в направлении совершенствования процедуры проектирования технологической оснастки [127]. Второе направление усиленно развивалось, в течение последних двух лет и к настоящему времени разработана оболочка подсистемы автоматизированного проектирования технологической оснастки для изготовления профилей стесненным изгибом, а также модули проектирования углового и швеллерного профилей (приложение 3). Подсистема предусматривает ввод геометрических параметров профиля, данных о материале заготовки, информации об оборудовании, на основе которых осуществляется расчет по разработанным моделям конфигураций переходов, формируются исходные данные для выполнения чертежей оснастки. Подсистема выполнена на языке программирования TURBO PASCAL версии 6.0 с применением объектно-ориентированного программирования (TURBO VISION) и работает в операционной системе MS-DOS версии 3.2 и выше. В качестве технических средств использован компьютер IBM PC/AT и плоттер формата А3. Окончательный результат представляется в виде готовых чертежей технологической оснастки. Применение подсистемы позволит сократить трудоемкость проектных работ в 5–7 раз и время технологической подготовки производства в 3–4 раза. При этом будет создан коммерческий программный продукт, который вместе с поставляемым оборудованием позволит удовлетворить насущные потребности производителей и потребителей профильной продукции.

Ещё одним направлением развития технологии стесненного изгиба является поиск и разработка способов формообразования профилей из перспективных труднодеформируемых материалов [128] том числе дисперсно упрочненных

[117,129] с расширением номенклатуры осваиваемых профилей.

В части разработки оборудования следует ориентироваться на узкоспециальные станки, предназначенные для выпуска одного–двух видов профилей. К настоящему времени разработано более 15 единиц основного и вспомогательного оборудования для изготовления профильной продукции, которое может успешно использоваться не только на предприятиях авиастроения, но и на машиностроительных, ремонтных, строительных, сельскохозяйственных и других предприятиях.

Дальнейшее совершенствование процессов формообразования профилей из листа методом стесненного изгиба гибкой – прокаткой должно идти по пути достижения, как прямолинейности профилей, так и заданной кривизны с точностью в пределах $0,3 \div 0,1$ мм/м.

Для обеспечения таких показателей точности необходимы дальнейшие исследования процессов, протекающих в материале заготовка при формообразовании. Особенно важным является изучение влияния на прямолинейность и заданную кривизну, воздействие на зону плавного перехода заготовки от пред-варительной формы к профилю окончательной геометрии поперечного сечения.

Из опыта работы известно, что влияние на прямолинейность оказывает угол входа заготовки в калибр окончательного формообразования, что также подлежит дальнейшему исследованию.

Совершенствование процесса управления очагом формообразования с целью получения прямолинейных профилей следует проводить с учетом уменьшения концевых участков профилей, имеющих большие поводки, чем его средняя часть.

Исследования и разработку технологии необходимо вести с позиций предупреждения поводов профилей на всех этапах их получения, начиная с раскроя заготовок.

Особое внимание следует уделить исключению ошибки оператора при настройке и эксплуатации оборудования. Поэтому целесообразно провести комплексную автоматизацию разработанного оборудования.

В настоящее время уже осуществляется разработка и частичное внедрение групповой поточной линии по изготовлению профилей и деталей из них методом стесненного изгиба. Целесообразным является применить в данном оборудовании систему автоматизированного управления процессом формообразования и настройки станка, позволяющего исключить возможность ошибки оператора – наладчика, при настройке станка на режим гибки.

Применение в качестве заготовки дна гибки ленты, вместо используемых в настоящее время в отрасли листов алюминиевых сплавов, позволит во многом сократить технологический цикл обработки и упростить автоматизацию процесса.

Данную работу целесообразно выполнить на базе достаточно качественно разработанных автоматизированных узлов и оборудования.

Определенный интерес представляет освоение процесса калибровки поперечного сечения и правки по длине прессованных профилей, с применением

станка ГПС – 200М и разработанного правильного устройства. Для этого достаточно использование одного из клеток станка ГПС – 200М с роликами, имеющими формующий калибр по форме и размерам обрабатываемого профиля. Таким способом, возможно, устранять дефекты поперечного сечения, такие как искривление полок, отклонение угла сопряжения полки и стенки, устранение которых другими методами затруднено.

Решение такой задачи позволило бы снизить значительно трудоемкость правильных и доводочных работ, так как позволило бы проводить как правку по длине, так и калибровку поперечного сечения, исключая прогиб полок и стенок, их волнистость и т. д.

Возможно и проведение одновременной малковки профилей на небольшие углы.

Основываясь на материалах данной работы, такие операции при минимальной доработке можно ускоренно внедрить,

В настоящее время разрабатываются схемы формообразования, технологические процессы и оборудование для изготовления гофрированных панелей гибкой из листовых заготовок.

Особое внимание, при этом, также необходимо уделить вопросам их прямолинейности и созданию требуемой кривизны при формообразовании. Необходимо заметить, что совершенствование процессов формообразования профилей с обеспечением прямолинейности следует вести как путем создания совершенного оборудования для получения профилей, так и при помощи разработки новых способов предупреждения поводов.

Поиск и обработку таких способов необходимо вести на основе методически последовательной организации научно – исследовательских работ.

Публикация результатов данной работы и внедрение разработанной технологии и оборудования выявили значительную заинтересованность различных машиностроительных, судостроительных, строительных, ремонтных, сельскохозяйственных, кооперативных и других предприятий в приобретении быстропереналаживаемого и мобильного оборудования по изготовлению различных гнутых профилей для различных конструкций и товаров народного потребления.

В этих условиях реализация имеющихся разработок и дальнейшее исследование процессов получения прямолинейных профилей и профилей, имеющих заданную продольную кривизну, сохраняют свою актуальность.

Экономическая эффективность таких исследований в условиях полного хозрасчета подтверждена проведением хоздоговорными работами

Выводы по разделу 9

1. Экономический эффект от внедрения на двух предприятиях технологии и оборудования для получения гибкой – прокаткой стрингеров из листовых материалов с обеспечением прямолинейности в очаге стесненного изгиба превысил 260 тыс. рублей.

2. Определены перспективы дальнейших исследований процессов получения прямолинейных профилей и профилей с заданной кривизной при гибке – прокатке.

3. Сформулированы задачи возможных продолжений начатых в данной работе исследований.

4. Показана актуальность данной тематики и ее жизнеспособность в условиях работы на полном хозрасчете.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(будет по – другому!)

1. Выявлены факторы интенсификации процесса формообразования типовых профилей при стесненном изгибе с целью уменьшения числа переходов и повышения качества профиля: схемы формообразования, приложение аксиальных и поперечных усилий к заготовке на входе и выходе из пары роликов окончательного формообразования, приложение радиальных усилий к заготовке в зоне сгиба.

2. Разработаны математические модели процесса формообразования уголкового зоны на основе методов прямого интегрирования, метода линий скольжения и метода конечных элементов. Аналитические модели асимптотически корректны и являются обобщением моделей обычной гибки на случай стесненного изгиба. Проведено сравнение решений в различных методах. Построены модели формирования продольной кривизны профиля и его правки, совмещенной с формообразованием. Кривизна профиля является функцией конфигурации профиля, схемы формообразования и технологических параметров. Модели обеспечивают соответствие описания реальных процессов формообразования в пределах 18–12 %.

Также получены модели, описывавшие реализацию переднего и заднего поджатия профиля в очаге деформации окончательного перехода, сформулированы ограничения на допустимые усилия и область применения данной технологии. Разработана модель определения протяженности зоны плавного перехода, использованной для определения межклетьевого расстояния при проектировании станков ГПС–200М1 и ГПС–200М11 и для определения предельно допустимого угла подгибки при разработке технологии изготовления профилей. Длина зоны плавного перехода оказывается практически независимой от механических свойств заготовки.

На основе построенных моделей напряженно-деформированного состояния заготовки получены формулы определения энергосиловых параметров, используемые при проектировании оснастки, правильного устройства, силовой передачи и выборе электродвигателя. Разработанные модели позволяют формализовать процедуры проектирования технологии и в последующем внедрить их в составе систем автоматизированного проектирования в систему управления авиационным предприятием.

3. Проведены экспериментальные исследования энергосиловых параметров, значения которых отличаются не более, чем на 28% от теоретических. На основе

разработанного классификатора изучены 20 схем формообразования типовых профилей; из них были отобраны шесть наиболее благоприятных схем, исходя из критерия удовлетворительного качества профилей при минимальном числе переходов.

Также изучены схемы классификатора, учитывающие влияние радиальных усилий. Установлено, что наиболее благоприятными являются схемы двустороннего обжатия зоны сгиба и посадки на инструмент ее наружного контура. При этом определены предельно допустимые значения ширины заготовки. Исследованы схемы классификатора, предусматривающие приложение аксиальных усилий в очаге деформации окончательного перехода. Выявлено, что задний подпор незначительно влияет на утолщение в зоне сгиба, в то время как передний подпор существенно увеличивает толщину материала в зоне сгиба (дополнительно на 5...15 %).

4. Отлажена технология, изготовлены опытные партии профилей, проведены испытания механических свойств, показавшие соответствие их требованиям ОСТ 190125–83, испытания на местную потерю устойчивости (значения критических напряжений соответствуют уровню от 0,55 до 0,90 по отношению к пределу текучести) выполнены металлографические исследования структуры, коррозионные испытания и испытания на сопротивление малоциклового усталости. Все виды испытаний свидетельствовали удовлетворительном качестве профилей.

5. Разработаны отраслевые нормативно-технические документы в составе методических материалов, технологических рекомендаций, руководящего технического материала, директивного технологического процесса, которые утверждены НИАТ, ВИАМ и действуют в отрасли.

6. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны, изготовлены, отлажены и внедрены в производство станки моделей ГПС–200М1 и ГПС–200М11, технологическая оснастка, отработана технология изготовления различных профилей из сплавов Д16, 1163, В95, 1420 с экономическим эффектом более 200 тыс. руб.

1. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно-технические обоснования процесса формообразования гибкой – прокаткой стрингеров из листовых материалов с обеспечением прямолинейности в очаге стесненного изгиба.

2. Разработана оригинальная схема правки с созданием правильного устройства, управляющего очагом пластической деформации с обеспечением прямолинейности получаемых профилей.

3. Разработан классификатор возможных процессов, предупреждающих поводки профилей в очаге стесненного изгиба при гибке – прокатке. По основным группам процессов, представленных классификатором, исследовано 11 различных видов правильных блоков.

Проведен анализ их исследования и сделаны рекомендации по внедрению разработанного правильного устройства.

4. Разработана, изготовлена и использована при экспериментальных исследованиях специализированная установка, обеспечивающая замеры и запись на осциллограммы перемещения и усилия, возникающие на предлагае-

мом правильном блоке в процессе предупреждения поволоки профилей.

5. Тензометрирование параметров процесса позволило раскрыть схему работы устройства, величины перемещений элементов правильного блока и создающихся в них усилий при самонастраивании системы.

6. Экспериментально и теоретически определены зависимости между получающимися поводками профилей, усилиями в правильном блоке и исходными параметрами: шириной исходной заготовки, механических свойств материала, диаметров роликов, видом применяемой правильной оснастки, зазорами в формирующем калибре. Результаты экспериментальных и теоретических исследований имеют сходимость в пределах 20%.

7. Впервые установлена, исследована и использована для обеспечения прямолинейности в техпроцессе изготовления профилей связь правильного самонастраивающегося блока с очагом стесненного изгиба.

8. На базе разработанного технического задания разработано, изготовлено и внедрено специализированное оборудование – гибочно-прокатные станки ГПС – 200М, ГПС – 200, содержащие правильное устройство, конструкция которого защищена тремя авторскими свидетельствами на изобретение.

9. Разработаны и внедрены требования к конструкции и размерам формообразующей и правильной оснастки, способствующие стабилизации процесса стесненного изгиба и получению прямолинейных профилей.

10. Разработана и внедрена в опытном и серийном производствах технология изготовления гибкой – прокаткой стрингеров из листовых заготовок алюминиевых сплавов Д16, В95, 1163 с обеспечением прямолинейности в очаге стесненного изгиба.

11. Результаты данной работы внедрены на заводах отрасли в опытном производстве на предприятии п/я Р – 6327 и серийном производстве, на предприятии п/я Р – 6314 с экономическим эффектом более 200 тыс. рублей.

Использование результатов проведенных исследований позволило обеспечить изготовление профилей для изделия «114».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саркисян С.А., Старик Д.Э. Экономика авиационной промышленности. - М.: Высшая школа, 1985.-320 с.
2. Технология самолетостроения. (Под ред. А.Л. Абибова), М.: Машиностроение, 1970 г. - 598 с
3. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. М.: Машиностроение, 1979г. - 360с.
4. Осипов В. П. Совершенствование заготовительно-штамповочного производства. Авиационная промышленность.- 1980г.- № 9 с. 39-4, ДСП.
5. Марковцев В.А. Разработка и внедрение технологии и оборудования для изготовления прямолинейных листовых профилей для авиационных конструкций методом стесненного изгиба. Дисс. канд. техн. наук. - М.,1991. - 202 с.
6. Каталог профилей, применяемых фирмами «Боинг», «Локхид», «Норд – Америкен», «Дженерал – Дайнемикс» - по материалам фирм.
7. Гурченков Н.И. Исследование процессов формообразования листовых профилей стесненным изгибом при гибке - прокатке. Дис. канд. техн. Наук., Куйбышев.- 1975г. - 197с.
8. Колганов И.М. Исследование процессов формообразования листовых профилей стесненным изгибом при волочении. Дис. канд. техн. наук, Куйбышев, 1983г. - 257с.
9. Проскуряков Г. В. Исследование стесненного изгиба. Дисс. канд. техн, наук. Харьков.- 1966г.- 195с.
10. Самолеты ближайшего будущего // Гражданская авиация. - 1990.- 3. С. 22 - 27.
11. Никольский Л.А., Фиглин С.З., Бойцов В.В., Калинин Ю.Г., Бахарев А.В. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов. -М.: Машиностроение, 1975. - 285 с.
12. Скрипачев А.В., Проскуряков Г.В., Ренне И.П. Стесненный изгиб - прогрессивный метод изготовления профилированных деталей из листа. - В кн.: Современные методы малоотходной и безотходной технологии в машиностроительном производстве.: Тез. докл. республик. конф. - Кишинев, 1982. - С. 92-94.
13. Гайнутдинов Р.Г. Усталостная прочность и коррозионная стойкость фюзеляжных стрингеров из прессованных и катанных полуфабрикатов. // Авиационная промышленность. - 1985. - 5. - С. 19 - 20.
14. Свиницкий А.М. Воронкин Н.Ф., Карлашов А.В., Гайнутдинов Р.Г. Исследование коррозионной активности фюзеляжного конденсата пассажирских самолетов.// Физико - химическая механика материалов. - 1982. - 5 - С. 70 - 72.
15. Карлашов А.В., Савицкий А.М., Токарев П.В. Исследование коррозионной стойкости элементов внутреннего силового набора.// Авиационная промышленность. - 1986. - 11. - С. 69 - 71.

16. Производство и применение гнутых профилей проката. / Под общ. ред. И.С. Тришевского и др. - М.: Металлургия. - 1975. - 536 с.
17. Скрипачев А.В. Изготовление из листа профилей повышенной жесткости стесненным изгибом на кромкогибочных машинах. Дисс. канд. техн. наук. - Тула, 1983. - 242 с.
18. 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.
19. Aluminium alloy development well improve performance // Aviation week and space technology. - 1988. - V. 129. - 14. - P. 57 - 58.
20. Picard C.A. Emploi des nouveaux materiaux et des nouvelles technologies dans la structure des avions modernes // Laeronautique et l'astronautique. - 1988. - V. 3. - 130. - P. 4 - 29.
21. Kubel E.J. Advanced aerospace materials // Materials engineering. - 1984. - V. 100. - 3. - P. 47 - 53.
22. Habermann A. Metallische Werkstoffe und Fertigungstechnologien fur die Luftfahrt // Neue Werkstoffe. - 1987. - V. 36. - 22. - S. 37 - 40.
23. Власов В.И. Краевые задачи в областях с криволинейной границей. - М.: ВЦ АН СССР, 1987. - 272 с.
24. Гиммельфарб А.Л. Основы конструирования в самолетостроении. - М.: Машиностроение, 1980. - 367 с.
25. А.С. 176861 (СССР). Устройство для гибки полосы/ Г.В. Проскуряков. - Оpubл. в БИ. - 1965. - 24.
26. Проскуряков Г.В. Стесненный изгиб.// Авиационная промышленность. - 1966. - 2. - С. 9 - 13.
27. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. - М.: Машиностроение, 1977. - 273 с.
28. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. - Л.: Машиностроение, 1979. - 520 с.
29. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1981. - 224 с.
30. А.С. 185827 (СССР). Способ гибки профилей из листового материала/ Г.В. Проскуряков, Е.Н. Вожаев, А.А. Терентьев и др. - Оpubл. в БИ. - 1966. - 18.
31. Калужский И.И. Проскуряков Г.В. Гибка листов на малые радиусы. - В кн.: Теоретические основы расчетов технологических процессов кузнечно-штамповочного производства. - Куйбышев, изд-во КуАИ, 1973. - С. 74 - 81.
32. Ершов В.И. Хронусов В.С. Гибка листового материала со сжатием в радиальном направлении.// Изв. вузов. Авиационная техника. - 1974. - 1. - С. 117 -121.
33. Ершов В.И. Изгиб со сжатием в тангенциальном направлении листов из титановых сплавов и стали ВНС - 2. // Авиационная промышлен-

- ность. - 1974. - 8. - С. 46 - 48.
34. Зажигин А.С., Проскуряков Г.В., Букин В.И. Изготовление профилей и панелей из сплавов ОТЧ - 1 и ВНС - 2 стесненным изгибом. // Авиационная промышленность. - 1967. - 9. - С. 26 - 30.
 35. Калужский И.И., Проскуряков Г. В. Напряженно – деформированное состояние при стесненном изгибе. Тольятти, 1972г.- 15с. Рукопись представлена Тольяттинским политехническим институтом. деп. в НИИНавтопром 5 окт. 1972г. № 730057.
 36. Калужский И. И., Проскуряков Г. В. Внутренние силовые факторы стесненного изгиба. Тольятти.- 1973г.- 7с. Рукопись представлена Тольяттинским политехническим институтом. Деп. в НИИНавтопром 30 окт. 1973г. № 730058.
 37. Бахтинов В.Б. Прокатное производство. М.: Металлургия.- 1987г.
 38. Производство гнутых профилей (оборудование и технология) / Под общ. ред. И. С. Тришевского и др. — М.: Металлургия, 1982. — 384 с.
 39. А.С. 385646 (СССР). Устройство для гибки полосы / Г.В. Проскуряков, Д.П. Аникин, Н.И. Гурченков. - Опубл. в БИ, 1973. - 26.
 40. А.С. 1503165 (СССР). Устройство для гибки / Г.В. Проскуряков, В.И. Филимонов Не подлежит опубликованию в открытой печати.
 41. Калужский И.И. Исследование процесса штамповки гофров из листовых анизотропных материалов методом стесненного изгиба при производстве летательных аппаратов. - Дис. канд. техн. наук. - Тольятти. Изд-во ТПИ, 1975. - 140 с.
 42. Ершов В.И., Красов А.С. Одновременный изгиб нескольких заготовок. // Авиационная промышленность. - 1977. - 10. - С. 41 - 43.
 43. Ершов В.И. Гибка листового материала с радиальным противодавлением.// Авиационная промышленность. - 1977. - 9. - С. 38 - 41.
 44. А.С. 460672 (СССР). Способ формообразования тонкостенных профилей / Г.В. Проскуряков. Не подлежит опубликованию в открытой печати.
 45. А.С. 212218 (СССР). Способ гибки профилей из листового материала / Б.М. Алякринский, Г.С. Гумиров, А.Н. Ткаченко. - Опубл. в БИ, 1968. - 9.
 46. А.С. 1049138 (СССР). Способ формообразования листовых профилей и устройство для его осуществления/ И.А. Кисилenko, И.Л. Шитарев. - Опубл. в БИ, 1983. - 39.
 47. Колганов И.М., Проскуряков Г.В. Исследование процесса формообразования профилей стесненным изгибом в инструментальной фильере. - Тольятти: 1979. - 9 с. Рукопись представлена Тольяттинским политехническим ин-том. Деп. в ВИНТИ 15.02.79, Д 1096 - 79.
 48. Клубович В.В. Влияние схем подвода ультразвуковых колебаний на усилие волочения титановых сплавов. - В сб.: Пластичность и обработка металлов давлением. - Минск: Наука и техника, 1974. - С. 74 - 78.
 49. А.С. 343739 (СССР). Способ изготовления профилей из труднодефор-

- мируемых материалов / Л.А. Никольский, В.Л. Арутюнов, В.И. Кузьмин. - Опубл. в БИ, 1972. - 21.
50. Чекмарев А.П., Калужский В.Б. Гнутые профили прокатки. - М.: Металлургия, 1974. - 264 с.
 51. Колганов И.М., Проскуряков Г.В., Ломакин В.П. Исследование процесса формообразования профилей стесненным изгибом в роликовых фильерах. // Авиационная промышленность. - 1982. - 7. - С. 36 - 39.
 52. Колганов И.М. Возможности формообразования листовых профилей стесненным изгибом при волочении через роликовую фильеру. // Авиационная промышленность. - 1984. - 9. - С. 36 - 38.
 53. Колганов И.М., Проскуряков Г.В., Филимонов В.И. Теоретические исследования стесненного изгиба при формообразовании тонкостенных профилей из листа волочением. - Рукопись представлена в ВИМИ 26.07.85. - Д06294.
 54. Колганов И.М., Савчук С.И., Маз А.Ф., Колганов В.И. Формообразование профилей из листа на волочильно-прокатной установке. // Авиационная промышленность. - 1986. - 7. - С. 46 - 48.
 55. Ершов В.И. Изгиб листового материала с осевым нагружением. // Авиационная промышленность. - 1977. - 1. - С. 15 - 18.
 56. Богоявленский К.Н., Григорьев А.К. Изготовление тонкостенных профилей из титана и его сплавов на профилегибочном стане. - В кн.: Обработка металлов давлением. Труды ЛПИ. - Вып. 222. - М. - Л.: Машгиз, 1963. - С. 148 - 150.
 57. Проскуряков Г.В., Гурченков Н.И., Никольский В.В. Изготовление стесненным изгибом тонколистовых титановых профилей с нагревом профилированной полосы. // Авиационная промышленность. - 1974. - 4. - С. 46 - 49.
 58. Зажигин А.С., Проскуряков Г.В. Анализ схем формообразования толстолистовых профилей стесненным изгибом. // Авиационная промышленность. - 1968. - 9. - С. 9 - 11.
 59. Проскуряков Г.В., Камышков А.С. Изготовление профилей из алюминиевых и магниевых сплавов стесненным изгибом. // Авиационная промышленность. - 1973. - 2. - С. 48 - 51.
 60. Ершов В.И., Гаврилин В.Д., Медведев Ю.Р., Инзарцев А.В. Изготовление уголкового профиля гибкой с осадкой листовых заготовок. // Авиационная промышленность. - 1983. - 6. - С. 39 - 41.
 61. Ершов В.И., Половцев В.А., Глазков В.И., Инзарцев А.В. Технологический процесс гибки с прокатыванием роликом. // Авиационная промышленность. - 1983. - 8. - С. 34 - 36.
 62. Flohr S., Petzold W., Neubauer A. Übertragbarkeit der Gesetzmäßigkeiten beim Profilieren von Metallband auf verschiedene Profilquerschnittsformen. // Fertigungstechnik und Betrieb. - 1976. - V. 26. - 9. - S. 544 - 547.

63. Neubauer A., Eichhorn A., Angrabeit H - J. Progressive Profilier-technologien. // Fertigungstechnik und Betrieb. - 1985. - V. 35.-№ 8. - S. 465 - 469.
64. Developments in roll forming and bending. // Welding and metal fabrication. - 1986. - V. 54. - 8. - P. 354 - 356.
65. Profil - Walzanlagen van Otterloo // Blech - Rohre - Profile. 1985. - V. 32. - №10. - S. 569 - 571.
66. Nuevas tecnologias para el perfilado en frio // Novamaquina. - 1986. - № 126. - P. 133 - 137.
67. Березовский С.Ф. Производство гнутых профилей. - М.: Металлургия, 1985. - 200 с.
68. Изготовление гнутых листовых профилей повышенной жесткости из труднодеформируемых материалов. / Абдулин Ф.З., Колганов И.М., Проскуряков Г.В. и др. // Кузнечно - штамповочное производство, 1987. - 3. - С. 18 - 21.
69. Семененко Ю.Л. Отделка профилей и труб давлением. М.: Металлургия.- 1972 г. Слоним А.З., Сонин А.Д. Правка листового и сортового металла. М.: Металлургия.- 1981г.
70. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение.- 1968г. - 272с.
71. Биргер И.А, Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. М.: Наука.- 1986г. - 560с.
72. Марковцев В.А., Филимонов В.И., Проскуряков Г.В. О выборе конструктивных параметров правильного устройства на основе анализа динамического режима. Авиационная промышленность.- 1988г., №9, ДСП.
73. Марковцев В.А. Правильное устройство профилегибочной линии 4 MIS - 10 Японской фирмы НАКАТА. Авиационная промышленность., 1985г. №11., с. 89, ДСП.
74. А. С. № 626857 (СССР). Устройство для правки профилей. (Веденеев И.Р., Гамеров М. А., Щумилов С. В.)-опубл. в Б.И.1978, № 37.
75. Патент США. № 3501937, кл. 72-250 Оpubл. 24. 03. 1970 г.
76. Ренне И.П. Пластический изгиб листовой заготовки. - В кн.: Труды Тульского механического ин-та, - 1950. - Вып. 4. - С. 146 - 162.
77. Хилл Р. Математическая теория пластичности. - М.: Изд-во ГИТТЛ, 1956. - 407 с.
78. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.
79. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1979. - 119 с.

80. Стрельбицкая А.И., Колгадин В.А., Матошко С.И. Изгиб прямоугольных пластин за пределами упругости. - Киев: Наукова думка, 1971. - 244 с.
81. Гофман О., Закс Г. Введение в теорию пластичности для инженеров. - М.: Изд-во ГНТИМЛ, 1957. - 279 с.
82. Матвеев А.Д. Пластический изгиб листа при неизменной толщине. - Изв. вузов. М.: Машиностроение, 1983. - 1. - С. 12 - 18.
83. Алексеев Ю.Н. Пластический изгиб при формообразовании гофрированных панелей методом стесненного изгиба. - В кн.: Самолетостроение и техника воздушного флота. - Харьков.: Изд-во ХГУ, 1968. - Вып. 16. - С. 79 - 84.
84. Пацека И.Е., Ланько В.В., Головня Ю.Н., Темников Э.М. Исследование напряженного состояния металла при изгибе со сжатием. - В кн.: Гнутые профили проката. - Харьков: Изд-во УкрНИИМет, 1974. - Вып. 2. - С. 118 - 123.
85. Ершов В.И., Зажигин А.С. Изгиб идеально-пластичной полосы со сжатием в штампе. - Изв. вузов: Авиационная техника. - 1972. - 2. - С. 170 - 173.
86. Проскуряков Г.В. Гипотеза ортогональности и метод осреднения в задачах плоской пластической деформации. - Тольятти, 1981. - 17 с. - Рукопись представлена Тольяттинским политехническим институтом. Деп. в ВИНТИ 14.01.81, 175 - 81.
87. Прагер В. Проблемы теории пластичности. - М.: Физматгиз, 1958. - 136 с.
88. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. - М.: ГЛСА, 1954. - 288 с.
89. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1968. - 512 с.
90. Альперт В.Н., Проскуряков Г.В., Зажигин А.С. Теоретическое исследование процесса получения профилей при протягивании через инструментальную фильеру металлической ленты с непрерывно скользящим приложением сжимающего усилия в процессе формообразования угла. // Изв. вузов. Сер. Авиационная техника. - 1968. - 3. - С. 107 - 113.
91. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. - М: Наука, 1969.-420 с.
92. Johnson W., Yu T. X. Influence of axial force on the elastic - plastic bending and Springback of a beam. // J. Mech. Work. Technol. - 1982. - 6. - P. 5 - 21.
93. El-Domiaty A., Shabaik A.H. Bending of work - hardening metals under the influence of axial load. // J. Mech. Work. Technol. -1984. -10. - P. 57 - 66.
94. Арышенский Ю.М. Гречников Ф.В., Арышенский В.Ю. Получение рациональной анизотропии в листах. - М.: Металлургия, 1987. - 144 с.
95. Яковлев С.П., Кухарь В.Д. Штамповка анизотропных заготовок. - М.: Машиностроение, 1986. - 136 с.

96. Арышенский Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов. - Саратов. Изд-во СГУ, 1973. - 111 с.
97. Loret B. On the effects of plastic rotation in the finite deformation of anisotropic elasto - plastic materials. // Mech. Mater. - 1983. - V. 2. - 4. - P. 287 - 304.
98. Stein Manuel Postbuckling of long anisotropic plates loaded in combined transverse compression and longitudinal compression or shear. // AIAA/ASME/ASCE/AMS 25 - th Struct., Struct. Dyn. and Mat. Conf., Calif. 14 - 16 May, 1984. - P. 444 - 451.
99. Киути, М. Проблемы и оптимизация профилирования в валках / М. Киути // Сосэй то како, 1974. - Т. 15. - № 165. - С. 811 - 819. - Пер. с яп. № 11802/74. - Харьков: УкрНИИмет, 1976. - 32 с.
100. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процессов профилирования. - М.: Металлургия, 1980. - 288 с.
101. Kokado J., Onoda Y. On edge waves occuring in forming a circular channel section with side flanges by cold roll forming. // Memories of Kyoto University (Faculty of Engineering). - 1977. - V. 39. - 2. - P. 225 - 244.
102. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
103. Weng G.A. A micromechanical theory of grain - size dependence in metal plasticity. // J. Mech. phys. solids. - 1983. - V. 31. - 3. - P. 193 - 203.
104. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. - Л.: Машиностроение, 1978. - 368 с.
105. Прудников М.И. Разрушение и минимальный радиус изгиба. - В кн.: Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. - М.: Изд-во ГНТИЛЧЦЛ, 1964. - С. 323 - 326.
106. Zak M. Mathematical model of wrinkling phenomenon in structures. / Math. Model. Sci. and Technol. 4th Int. Conf., Zurich, 15 - 17 Aug. 1983. New York, 1983. - P. 573 - 578.
107. Уваров В.В., Арышенский Ю.М. Основы расчета предельного формоизменения в процессах листовой штамповки. - Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1973. - 48 с.
108. Проскуряков Г.В., Решетников Д.А., Скрипачев А.В., Богданов Б.В. Исследование предельного формоизменения листов из сплава АБМ - 1 при стесненном изгибе. // Авиационная промышленность. - 1985. - 7. - С. 73 - 74.
109. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение.- 1981г.-184с.
110. Никитин К. Е. Исследования листовых профилей, изготовленных стесненным изгибом из сплава 01420 рентгеноструктурными методами / К.Е. Никитин, Е.Н. Чебурахин, Г.В. Проскуряков // Авиационная промышленность. - 1988. - № 9. - С. xxx

111. Марковцев В.А. Выбор схемы правки профилей при их формообразовании методом стесненного изгиба // В.А. Марковцев, Г. В. Проскуряков // Авиационная промышленность. – 1988. – №7. – С. xxx.
112. Филимонов В.И. Использование гипотезы ортогональности в одной задаче стесненного изгиба. Ульяновский политехнический ин-т. Ульяновск, 1984. - 23с. - Рукопись деп. в ВИНТИ 16.04.84, N 2366-84.
113. Филимонов В.И., Проскуряков Г.В., Москвин А.С. Напряженное состояние при стесненном изгибе. // Пластическое формообразование деталей авиационной техники. Сер. Авиационная техника. 1987. - С. 38 - 43.
114. Горлач Б.А., Ефимов Е.А., Филимонов В.И. Использование метода конечных элементов в задачах формообразования профилей стесненным изгибом. // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология. 1990. - N 1(14). - С. 3 - 8.
115. Филимонов В.И., Проскуряков Г.В., Москвин А.С., Колганов И.М. Стесненный изгиб и граничные условия. // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология. 1986. - N 1. - С. 44 - 47.
116. Гуляев А.А., Проскуряков Г.В., Филимонов В.И. Граничные условия в задачах гибки с торцевым поджатием. // Авиационная промышленность. 1987. - N - 4. - С. 54 - 55.
117. Филимонов В.И., Проскуряков Г.В., Марковцев В.А. Об одном подходе к разработке специального правильного устройства. // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. "Авиационная технология", 1989. N 1. - С. 27 - 34.
118. Колганов И.М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования. /И.М. Колганов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2001. – 108 с.
119. Филимонов В.И., Проскуряков Г.В., Марковцев В.А. Колганов И.М. К расчету технологических параметров гибки - прокатки с аксиальным сжатием. // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. "Авиационная технология", 1986. N 2. - С. 30 - 35.
120. Потеря устойчивости и выпучивание конструкций. / Под ред. Дж. Томпсона и Дж. Ханта. Пер. с англ. - М. Наука, 1991. - 424 с.
121. Абдулин Ф.З., Колганов И.М., Проскуряков Г.В., Филимонов В.И. Применение осевого подпора при формообразовании профилей из листа гибкой - волочением в условиях стесненного изгиба. // Авиационная промышленность, 1984. N 8. - С. 46 - 48.
122. Исследование деформируемости авиационных материалов с учетом анизотропии при формообразовании стесненным изгибом: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Ю. М. Арышенский, Г. В. Проскуряков. – № ГР УЗ4701. – М. : НИАТ, 1986. – 48 с.
123. Экспериментальное исследование процесса и разработка технологических рекомендаций по изготовлению профилей методом стесненного изгиба из сплава 01420, Д 16чТВ, В96: Отчет о НИР / Руководители В.

- И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин. – № ГР Ф27468. – М.: НИАТ, 1987. – 50 с.
124. Исследование, разработка и освоение оборудования и технологических процессов изготовления длинномерных профилей и деталей из перспективных алюминиевых сплавов: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин, В. А. Марковцев. – № ГР 035054. – М. : НИАТ, 1987. – 46 с.
 125. Исследование, разработка проекта и внедрение оборудования и технологических процессов изготовления длинномерных профилей и профильных деталей из листов заготовок алюминиевых сплавов 1163, В95: Отчет о НИР / Руководители по направлениям Г. В. Проскуряков, В. И. Филимонов, А. С. Москвин, В. А. Марковцев, З. Х. Мударисов. – № ГР Ф36102. – М. : НИАТ, 1988. – 50 с.
 126. Исследование влияния технологических параметров на деформируемость алюминиевых сплавов Д16, 1420 и композиционных материалов ВКА – 2 при формообразовании стесненным изгибом: Отчет о НИР / Руководители В. И. Филимонов, Г. В. Проскуряков, Ю. М. Арышенский. – № ГР У44766. – М. : НИАТ, 1988. – 48 с.
 127. 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.
 128. Исследование процессов и разработка РТМ по изготовлению профилей стесненным изгибом из алюминиевых сплавов Д16, 1163, В95, 1420: Отчет о НИР / Руководители А. С. Москвин, В. И. Филимонов. – № ГР ЦТ9340030. – М.: НИАТ, 1990. – 50 с.
 129. А. с. 1820547 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых уголкового профиля / В. И. Филимонов, А. С. Москвин, В. А. Марковцев. – Опубл. 12.10.92. ДСП.
 130. Филимонов, С.В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.
 131. ТР 1.4.1780 – 87 Изготовление профилей из плакиров. листов алюминиевых сплавов Д164, 1163 и В95 пч методом стесненного изгиба / Г.В. Проскуряков, А.С. Москвин, В.И. Филимонов и др. – М.: НИАТ, 1987. – 19 с.
 132. ТР 1.4.1624-86. Изготовление гнутых профилей методом стеснённого изгиба из сплава 01420./ Проскуряков Г.В., Филимонов В.И., Москвин А.С., - НИАТ, 1986. - 26 с.
 133. ТР 1.4.2023-90. Изготовление профилей и деталей из листовых заготовок сплавов марки 1430 и 1451 методом стесненного изгиба (Технологические рекомендации) / Н. И. Колобнев, И. М. Колганов, В. И. Филимонов и др. – Ульяновск: НИАТ, 1992.– 32 с.

134. ТР 1.2.1910 – 88. Изготовление деталей из профилей гнутых методом стесненного изгиба из плакированных листовых материалов Д16, 1163, В96пч / Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин В. И. Филимонов и др. – М.: ВИАМ, 1988. – 42 с.
135. ММ 1.4.1951 – 89. Проектирование и изготовление формующего инструмента для изготовления профилей из листа методом стесненного изгиба / В. И. Филимонов, А. С. Москвин, Б. В. Богданов, И. М. Колганов. – М. : НИАТ, 1989. – 48 с.
136. А. с. 1169772 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей проката / В. И. Филимонов, Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков, Б. Н. Глухов. – Оpubл. 30.07.85, Бюл. № 28.
137. А. с. 1660288 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления гнутых профилей / В. И. Филимонов, Г. В. Коновалов. – Оpubл. 1.03.91. ДСП.
138. А. с. 1248690 СССР, МКИ В 21 D5/06. Способ изготовления листовых профилей с отбортовками / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. И. Колганов, В. И. Филимонов. – Оpubл. 27.09.86. Бюл. № 29.
139. А. с. 1300737 СССР, МКИ В 21 D5/06. Способ изготовления профилей из труднодеформируемых материалов / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. И. Колганов, В. И. Филимонов. – Оpubл. 1.12.86. ДСП.
140. А. с. 1757162 СССР, МКИ В 21 D 5/06. Способ изготовления тонкостенных корытообразных профилей из листовых заготовок и устройство для его реализации / И. М. Колганов, А. С. Башилов, В.И. Филимонов и др. – Оpubл. 16.06.90. ДСП.
141. Филимонов, В. И. Определение размеров зон деформирования при профилировании / В. И. Филимонов // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Математическое моделирование в машиностроении». – Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1990. – С. 48.
142. Филимонов, В.И. Определение протяженности зоны плавного перехода при формообразовании профиля стесненным изгибом / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, А.С. Москвин // Авиационная промышленность, 1992. – № 7. – С.5 – 8.
143. Колганов, И.М. Применение модели пластического формоизменения / И.М. Колганов, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Авиационная промышленность. – 1996. – № 3 – 4. – С. 26 – 30.
144. Филимонов, В. И. Силовые параметры при стесненном изгибе и проектирование профилегибочного оборудования / В. И. Филимонов, А. С. Москвин // Авиационная промышленность. – 1994. – № 9 – 10. – С. 5 – 10.
145. Колганов И. М. Разработка и внедрение процессов формообразования листовых профилей авиационных конструкций стесненным изгибом при волочении: Дисс. канд. техн. наук: 05.07.04. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 296 с.

146. Проскуряков, Г. В. Исследование и разработка способа изменения кривизны профиля при стесненном изгибе / Г.В. Проскуряков, Е. Н. Чебурахин, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 9 – 13.
147. Филимонов В. И. Автоматизированная линия изготовления С – образного профиля методом стесненного изгиба / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев // Вестник УлГТУ. Сер. Машиностроение, строительство. – 1998. – № 2. – С. 50 – 55.
148. Филимонов В.И. Автоматизированная линия изготовления автомобильных бамперов и методика ее создания / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 4. – С. 29 – 31.
149. Схоутен Д.Ж. Тензорный анализ для физиков. М.: Мир.- 1974г. – 442с.
150. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука.- 1974г. – 832 с.
151. Прохоренко И.Ф. Унифицированные пружины растяжения и других типов / И.Ф. Прохоренко, Н.Л. Панченко, Е.К. Решетников. – М.: Металлургия. – 1985г. – 694с.
152. Гуле Ж. Сопротивление материалов. Справочное пособие. – М.: Высшая школа. – 1985г. – 192 с.
153. Филимонов, В. И. Касательные напряжения при стесненном изгибе / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 2000. – № 4. – С. 30 – 35.
154. Филимонов, В. И. Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В. И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 208 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	3
1.	ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ В АВИАСТРОЕНИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА	6
1.1.	Применение гнутых профилей в авиастроении	6
1.2.	Изготовление листовых профилей различными способами	15
1.2.1.	Гибка в кромкогибочных устройствах	16
1.2.2.	Изготовление профилей стесненным изгибом в штампах	17
1.2.3.	Изготовление профилей гибкой-волочением	20
1.3.	Изготовление профилей гибкой-прокаткой	21
1.4.	Профилировочное оборудование для стесненного изгиба	25
1.5.	Дефекты профилей и правка, совмещенная с формообразованием	26
1.6.	Учет различных факторов при теоретическом рассмотрении стесненного изгиба	35
	Выводы по разделу 1	39
2.	ПРАВКА ПРОФИЛЯ В ОЧАГЕ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА	41
2.1.	Классификация процессов предупреждения поволодок профилей при их формообразовании методом стесненного изгиба гибкой прокаткой	41
2.2.	Математическое планирование эксперимента	44
2.3.	Выбор схемы правильного устройства	47
	Выводы по разделу 2	58
3.	ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВБЛИЗИ ОСЕВОЙ ПЛОСКОСТИ РОЛИКОВОГО КАЛИБРА	
3.1.	Выбор схем действия внешних сил	
3.2.	Основные допущения при проведении теоретических исследований	
3.3.	Изучение напряженно-деформированного состояния при стесненном изгибе в уголкового зоне	
3.3.1.	Применение <i>метода прямого интегрирования</i>	
3.3.2.	Применение <i>метода линий скольжения</i>	
2.3.3.	Применение <i>метода конечных элементов</i>	
3.4.	Изучение условий формообразования в окончательном переходе	
3.5.	Реализация аксиального сжатия в очаге деформации	
3.5.1.	Аксиальное сжатие заготовки <i>в межклетьевом пространстве</i>	
3.5.2.	Предельные параметры <i>при переднем поджатии</i>	
	Выводы по разделу 3	
4.	СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И СИЛОВЫЕ ФАКТОРЫ ПРОЦЕССА	84
4.1.	Основные задачи и экспериментальное оснащение	84

4.1.1.	Цель и задачи экспериментальных исследований	84
4.1.2.	Основные факторы процесса и применяемые методы	85
4.1.3.	Программа исследования и применяемые средства	85
4.1.4.	Применяемые материалы	86
4.2.	Схемы формообразования при стесненном изгибе	87
4.3.	Формализация схем формообразования и число переходов	92
4.4.	Протяженность зоны плавного перехода	95
4.5.	Силовые параметры процесса формообразования профиля	97
4.6.	Влияние углов захода профиля в калибр при СИ	104
4.7.	Деформационные параметры и моменты, влияющие на продольную кривизну профиля	106
4.8.	Правильное устройство для устранения продольной кривизны	111
4.9.	Динамический режим работы правильного устройства	114
	Выводы по разделу 4	121
5.	ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА	122
5.1.	Моделирование уголковой зоны средствами ANSYS	122
5.2	Технологически допустимые и предельные параметры уголковой зоны	126
5.2.1.	Ограничения в уголовой зоне	126
5.2.2.	Ограничения при формовке композитов	130
	Выводы по разделу 5	133
6.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМО-ОБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЕГО ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ В ОЧАГЕ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА	135
6.1.	Методика проведения экспериментов	135
6.1.1.	Цели, задачи и основные параметры исследований	135
6.1.2.	Установка для замеров величин основных параметров правки	137
6.2	Проведение экспериментов и обработка результатов	141
6.2.1.	Экспериментальные исследования разработанной схемы правки	141
6.2.2.	Влияние ширины заготовки на поводки	157
6.2.3.	Определение влияния различных видов правильной оснастки на качество получаемых профилей	160
6.2.4.	Исследование влияния величин зазоров в калибре окончательного перехода на поводки профилей	163
6.2.5.	Выбор диаметров формирующих роликов при стесненном изгибе и влияние их величин на поводки	169
6.3.	Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований	173
	Выводы по разделу 6	180
7.	РАЗРАБОКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ СТЕСНЕННЫМ ИЗГИБОМ	182

7.1.	Этапы проектирования технологического процесса формообразования профилей в роликах	182
7.2.	Технологичность изготовления профилей	183
7.3.	Расчет ширины заготовки и параметры угловой зоны	185
7.4.	Выбор схем формообразования	187
7.5.	Выбор параметров зоны сгиба	187
7.6.	Учет влияния аксиального сжатия	190
7.7.	Выбор профилегибочного оборудования	193
7.8.	Требования к технологической оснастке	194
7.9.	Особенности изготовления зетобразных и специальных видов профилей	201
7.10.	Технологические маршруты изготовления профилей и деталей	203
7.10.1.	Влияние маршрута на механические свойства профиля	203
7.10.2.	Разработка маршрутов и директивной технологии	204
	Выводы по разделу 7	
8.	ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ	208
8.1.	Технические условия на изготавливаемые профили	208
8.2.	Разработка технологических маршрутов и директивной технологии	209
8.3.	Разработка и изготовление технологического оборудования и оснастки	212
8.4.	Применение разработанного правильного устройства	215
8.5.	Освоение оборудования и технологии	219
8.6.	Характеристики профилей	220
8.7.	Разработка нормативно – технической документации	226
	Выводы по разделу 8	226
9.	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА	227
9.1	Экономический эффект от внедрения технологии и оборудования	227
9.2.	Технико-экономические показатели применения гнутых из листа профилей	228
9.3	Перспективы развития технологии стесненного изгиба	232
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	236
	Библиографический список	238