

На правах рукописи

КОЛГАНОВ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРОГРЕССИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ВОЛОЧЕНИЕМ-ПРОКАТКОЙ ПРОФИЛЕЙ И ГОФРОВ
ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ
ИЗ ЛИСТОВЫХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность

05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара, 2007

Работа выполнена в Ульяновском государственном техническом университете и Научно-исследовательском институте авиационной технологии и организации производства (г. Комсомольск-на-Амуре)

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор **Филимонов Вячеслав Иванович**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Михеев Владимир Александрович**

доктор технических наук, профессор **Шеногин Владимир Петрович**

доктор технических наук, профессор **Шитарев Игорь Леонидович**

Ведущая организация: закрытое акционерное общество «АВИАСТАР-СП»

Защита состоится 21 марта 2008г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.03, созданном при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан «14» февраля 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Клочков Ю.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Настоящий «профильный бум», наблюдаемый в последнее десятилетие в различных областях производства и строительства, в том числе, при создании изделий авиакосмической техники, приводит к необходимости поиска новых материалов и технических решений, обеспечивающих высокое качество выпускаемой продукции при минимальных издержках производства.

Совершенствование конструкций летательных аппаратов в значительной степени зависит от выбора материала, рационального сечения и формы их конструктивных элементов, особенно в силовых конструкциях планера.

В современных и перспективных летательных аппаратах все более широкое применение находят и будут использоваться материалы повышенной прочности и малой пластичности, деформируемость которых вызывает ряд сложных проблем, а получение из них тонкостенных профилей и гофрированных панелей прессованием является технически трудноразрешимой задачей. Применение гнутых листовых профилей и других деталей из листа способствует решению проблемы создания технологичных изделий минимальной массы при заданных прочности и жесткости, но при этом необходимо уменьшить относительный радиус и увеличить толщину материала в зоне сгиба – приблизить геометрию к сечению прессованного профиля, что позволяет обеспечить метод стесненного изгиба (деформирование листовых заготовок в условиях сжато-напряженного состояния материала).

При обычной гибке листовых деталей с минимальным радиусом r_{min} из низкопластичных материалов возникает ряд технологически трудноразрешимых задач, относящихся к области больших пластических деформаций. При этом наблюдается утонение материала по зонам сгиба и возможен разрыв растянутых волокон по выпуклой поверхности. По этим причинам для каждого материала установлен минимально допустимый радиус гибки.

Изготовление деталей, в частности тонкостенных профилей и гофра, из традиционных и перспективных авиационных материалов с малыми относительными радиусами – важная для авиационного производства народнохозяйственная задача. Применение, например, в конструкциях сверхтяжелых широкофюзеляжных самолетов традиционно прессованных профилей не позволяет повысить их ресурс выше 30-35 тысяч часов, что не обеспечивает окупаемость машин при их мелкосерийном производстве. Поднять ресурс таких машин до 50-60 тысяч часов можно, прежде всего, за счет применения листовых профилей, ибо их ресурс в 2-3 раза выше, чем у прессованных.

Эффективным способом изготовления профилей и гофров повышенной жесткости и точности размеров из низкопластичных металлов является их формообразование волочением. По сравнению с известными процессами стесненного изгиба волочение профилей в роликовых устройствах позволяет: увеличить допустимые степени деформации и снизить число переходов, уменьшить опасность закручивания заготовки из-за разных по высоте роликов линейных скоростей,

изготавливать из низкопластичных материалов в холодном состоянии профили фасонного сечения, улучшить качество поверхности, значительно снизить трение, обойтись без калибровки с обеспечением высокой точности размеров.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью повышения ресурса летательных аппаратов и снижения массы панельных конструкций за счет замены пресованных профилей гнутолистовыми повышенной жесткости, с одновременным повышением их качества и надежности.

Работа выполнялась в Ульяновском государственном техническом университете, научно-исследовательском институте авиационной технологии и организации производства (г. Комсомольск-на-Амуре). В соответствии с отраслевыми мероприятиями постановки на производство модификации Су-27 и БКС.

ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью данной работы является разработка научных основ процессов формообразования тонкостенных профилей и гофров из листа в условиях сжато-напряженного состояния материала при волочении-прокатке; снижение массы конструкции планера летательного аппарата с повышением надежности.

В работе применен комплексный метод исследований, теоретической и методологической основой которого служили труды отечественных и зарубежных ученых, опыт передовых предприятий по проблемам изготовления профилей из листовых заготовок. Теоретические исследования проведены в развитие общей теории стесненного изгиба. Экспериментальные исследования выполнены как в лабораториях, так и в производственных условиях, с использованием современной измерительной и вычислительной техники.

Определены и решены следующие основные задачи исследований:

1. Разработка, исследование и выбор оптимальных схем формообразования профилей из листовых заготовок различных металлов при волочении и сочетании волочения с прокаткой;

2. Исследование напряженно-деформированного состояния материала при различных схемах формообразования и установление аналитических зависимостей силовых и геометрических параметров зоны сгиба профиля от марки материала;

3. Исследование математических зависимостей процесса волочения-прокатки при деформировании листовых материалов в роликовой фильере при создании аксиального сжатия;

4. Исследование режимов термомеханической обработки и их влияния на качество гнутых профилей из перспективных авиационных материалов;

5. Установление оптимальных параметров гнутых профилей и панелей при минимизации их массы и высокой несущей способности;

6. Установление предельных возможностей процесса деформирования листовых заготовок с обеспечением кондиционности изготовленных профилей;

7. Разработка на базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований технологических процессов изготовления тонкостенных профилей и гофров из различных листовых авиационных металлов и оборудования для их

реализации в промышленности с использованием волочения-прокатки в условиях стесненного изгиба;

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются корректностью применения математического аппарата и принятых допущений, хорошей сходимостью теоретических и экспериментальных данных, реализацией разработок в промышленности.

Область исследований:

1. Объекты авиационно-космической техники;
2. Разработка методов поиска оптимальных конструкторско-технологических решений при изготовлении гнутолистовых профилей и оборудования для их внедрения в конструкцию летательных аппаратов;
3. Установление математических зависимостей параметров процесса волочения-прокатки при изготовлении гнутолистовых профилей.

Объект исследований – тонкостенные гнутолистовые профили широкой номенклатуры из конструкционных авиационных материалов и панельные конструкции ЛА с их применением.

Предмет исследования – технологии стесненного изгиба при производстве гнутолистовых тонкостенных профилей гибкой-волочением и профилигибочное оборудование для их реализации.

Научная новизна. 1. Впервые создан классификатор процессов стесненного изгиба при волочении листовых профилей, в соответствии с которым разработаны и исследованы 18 схем их формообразования.

2. Впервые получены при волочении расчетные соотношения для определения параметров зоны сгиба профилей, ширины заготовки, параметров профилигибочного оборудования и усилия волочения в зависимости от механических свойств металлов и геометрии профилей. Построены соответствующие номограммы для их определения.

3. Впервые установлены математические зависимости параметров процесса волочения профилей при создании аксиального сжатия.

4. Впервые разработаны технологические процессы и опытно-промышленное оборудование с использованием ВТМО для производства тонкостенных профилей из АБМ1.

5. Впервые разработаны технологические процессы изготовления при волочении тонкостенных профилей из сплавов 1451, 1430 с использованием НТМО. Установлены параметры процесса и профилей для промышленного производства.

6. Впервые разработаны и рекомендованы для использования ОКБ и заводами отрасли технологические рекомендации ТР 1.4.1784-87 изготовления профилей из сплава АБМ1 и ТР 1.4.2023-90 из сплава 1451.

7. Впервые разработаны научные методики проектирования формующего роликового инструмента, которые используются на ряде предприятий отрасли.

8. Впервые проведены исследования сравнительной работоспособности образцов панелей с профилями из алюминиево-литиевых сплавов, изготовленных клепкой, сваркой и клеесваркой.

9. Впервые отработаны предельные значения при волочении параметров зоны сгиба, обеспечивающих кондиционность профилей для основных групп авиационных материалов.

Автор выносит на защиту:

1. Совокупность теоретических положений и экспериментальной отработки, позволивших решить крупную научно-техническую проблему повышения надёжности, ресурса и снижения массы панельных конструкций летательных аппаратов за счёт разработки и внедрения новых технических решений и научно-обоснованных технологий формообразования и оптимизации параметров тонколистовых профилей и конструкции панелей.

2. Классификатор процессов стесненного изгиба при волочении и сочетании волочения с прокаткой, позволяющий выбрать физическую модель процесса и схему формообразования листовой заготовки в профиль и гофр, установить напряженно-деформированное состояние материала в зоне сгиба;

3. Научные основы процесса волочения-прокатки, как результат теоретического и экспериментального исследования по обеспечению оптимальных соотношений параметров гнутолистовых профилей, изготовленных с их применением панельных конструкций, процессов профилирования и параметров профилигоночного оборудования;

4. Новые способы формообразования и технологические процессы изготовления тонкостенных профилей и гофров при холодной и горячей деформациях перспективных авиационных труднодеформируемых материалов стесненным изгибом при волочении и сочетании волочения с прокаткой, научная новизна которых подтверждена А.С. и патентами.

5. Принципиально новые варианты мобильного волочильно-прокатного оборудования, позволяющего изготавливать тонкостенные профили широкой номенклатуры из плоской заготовки при непрерывном профилировании с созданием тангенциального, нормального и аксиального сжатия в очаге деформации и правки профиля растяжением одновременно с возможностью его гибки по радиусу.

6. Рекомендации по конструктивно-технологическому совершенствованию летательных аппаратов за счет гнутых профилей минимальной массы и оптимизации параметров панельных конструкций.

7. Результаты внедрения разработанных технологий и оборудования в производство.

Практическая значимость работы. Разработана технология изготовления из листа профилей панельных конструкций летательных аппаратов швеллерообразной и корытообразной формы сечения с утолщенной зоной сгиба и радиусами, меньшими исходной толщины, волочением через роликовые устройства в холодном состоянии из высокопрочных нержавеющей сталей, труднодеформируемых алюминиевых и титановых сплавов стесненным изгибом с тангенциальным сжатием и осевым подпором.

Разработана технология изготовления при горячей деформации в условиях термомеханической обработки профилей из алюминий-бериллиевых сплавов.

Спроектирована, изготовлена и отработана технологическая оснастка для изготовления гнутолистовых профилей толщиной до 2,0 мм волочением-прокаткой с созданием тангенциального, радиального сжатия и аксиального подпора.

Разработана и изготовлена оригинальная волочильно-прокатная установка модели ВПУ-120/7,5, позволяющая изготавливать тонкостенные профили из листовых алюминиевых, титановых сплавов, нержавеющей стали и других низкопластичных металлов.

Разработаны методические материалы по проектированию и изготовлению формирующего инструмента. Разработана нормативная научно-техническая документация по изготовлению профилей и деталей из алюминий-литиевых и бериллиевых сплавов; методики и номограммы расчета ширины заготовки; рекомендации по установлению параметров зоны сгиба профилей и панельных конструкций с их применением. Разработанные технологические процессы и оборудование повышают коэффициент использования материала до 0,96-0,97; точность размеров профилей по сечению на 2-3 качества; снижают трудоемкость в 10-12 раз по сравнению с их изготовлением в штампах при горячей деформации, повышают в 5-6 раз производительность.

Полученные профили имеют повышенную на 25-30% жесткость по сравнению с изготовленными методами обычной гибки за счет локального утолщения по зонам сгиба $\eta=1,25-1,30$ для алюминиевых сплавов и нержавеющей стали, $\eta=1,12-1,20$ для титановых сплавов при холодной деформации и бериллиевых сплавов до $\eta=1,4-1,65$ при горячей деформации.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы в технологических процессах изготовления длинномерных профилей повышенной жесткости при обработке серийной технологии изготовления на КнААПО самолетов СУ-27 и его модификаций с использованием специализированного оборудования ВПУ-120/7,5; на ОАО НПО «Молния» при обработке технологии изготовления БКС с использованием специализированного оборудования ГПС-200 и ВПУ-170; при изготовлении опытно-промышленной партии профилей из алюминий-бериллиевых сплавов АБМ1 и АБМ4, алюминий-литиевых сплавов марки 1451, 1441 и 1430; при изготовлении тонкостенных профилей широкой номенклатуры из различных металлов на ОАО «Ульяновский НИИТ».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались с 1981 года по 2006 год более, чем на тридцати всесоюзных, российских и международных конференциях, Гагаринских и Королевских чтениях, симпозиумах и семинарах, на научно-технических конференциях и советах институтов, университетов, предприятий и организаций в городах Комсомольск-на-Амуре, Тольятти, Ленинграде, Москве, Самаре, Пензе, Ульяновске, в том числе секции «Заготовительное и металлургическое производство» ВИМИ (Москва, 1982); всесоюзном совещании «Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли» (Ульяновск, 1992); на республиканской НПК «Технологические проблемы производства летательных аппаратов

и двигателей» (Казань, 1993); на второй, третьей, четвертой, пятой научно-практических конференциях «Современные технологии в машиностроении» (Пенза, 1999, 2000, 2001, 2002); на третьей международной НПК «Экономика природопользования и природоохраны – 2000» (Пенза, 2000) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано более 140 печатных работ, из них одна монография, девять отчетов по НИОКР, четыре НТД (РТМ, ТР, ММ), 59 статей, 46 тезисов докладов, получено 33 авторских свидетельства и патентов на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка 222 наименований и приложений. Изложена на 267 страницах машинописного текста, содержит 99 рисунков, 25 таблиц и приложения на 54 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, определены объект и направление исследований, область применения, дана краткая характеристика работы.

Первая глава имеет обзорный характер. В ней проведен анализ современного состояния вопроса изготовления тонкостенных профилей и гофра и панельных конструкций планера летательных аппаратов с использованием различных материалов и способов гибки для их формоизменения. Рассмотрены проблемы получения профилей из листа с малыми относительными радиусами по зонам сгиба. Показано, что панель, подкрепленная профилями и гофром, изготовленными из листа, может иметь работоспособность, соизмеримую с фрезерованными панелями и использующими сотовый наполнитель, если они имеют внутренний относительный радиус эквивалентно толщине исходной заготовки и утолщение материала по зонам сгиба.

Развитие авиационно-космической техники связано со все более широким внедрением листовых материалов из высокопрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, сплавов на основе бериллия, с использованием лития и композиционных материалов. Это вызывает необходимость применения тонкостенных конструкций в основных силовых узлах и агрегатах, получение которых требует замены традиционно сложившейся технологии и оборудования. Изготовление тонкостенных профилей из листа становится в большинстве случаев единственным методом. Чтобы приблизить несущие способности листовых профилей к прессованным, их необходимо изготавливать с малыми относительными радиусами и утолщением материала по зонам сгиба. Такие возможности обеспечивает метод стесненного изгиба, по которому гибку листовых заготовок производят с созданием в очаге деформации условий, приближенных к трехосному сжатию, что позволяет повысить пластические свойства материала и вести формообразование профилей из труднодеформируемых материалов в холодном состоянии.

Показано, что изготовление тонкостенных профилей из листа низкопластичных металлов гибкой-волочением и при сочетании волочения с прокаткой в

наибольшей степени позволяет решать проблемы, стоящие перед конструкторами ОКБ и производственниками при создании новых летательных аппаратов.

В основе теории стесненного изгиба лежат положения классической теории пластического изгиба. Исследованию напряженно-деформированного состояния при обычной гибке посвящены работы М.Е. Зубцова, А.А. Ильюшина, Е.П. Унксова, Е.Н. Мошнина, И.П. Ренне, А. Надаи, М.В. Сторожева, М.И. Лысова, К.Н. Богдавленского и др. Теоретические положения строятся на гипотезе плоских сечений.

Для условий стесненного изгиба гипотеза плоских сечений оказывается неправомерной. Поэтому основные теоретические положения стесненного изгиба строятся на базе гипотезы ортогональных волокон, согласно которой продольные и поперечные линии в очаге деформации остаются ортогональными после деформации.

В определенной степени проблемы стесненного изгиба, как в теоретическом так и в экспериментальном плане, исследовались в работах Г.В. Проскурякова, как создателя метода стесненного изгиба, В.И. Ершова, Ю.М. Арьшенского, И.И. Калужского, Ф.В. Гречникова, И.Л. Шитарева, В.А. Костышева, И.А. Кисиленко, Н.И. Гурченкова и других, однако в них не рассматриваются процессы изготовления профилей и гофров гибкой-волочением.

Всесторонний анализ теоретических и экспериментальных исследований процессов формообразования из листа профилей и гофров в условиях стесненного изгиба показал, что имеющихся материалов совершенно недостаточно для разработки процесса их получения гибкой-волочением и при сочетании волочения с прокаткой.

На основании проведенного в главе анализа установлена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, изложенные в разделе автореферата «Общая характеристика работы».

Во второй главе приведены теоретические исследования стесненного изгиба при волочении. Теоретическими исследованиями следует выявить особенности при волочении напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, определить геометрические параметры зоны сгиба, характер действия внутренних силовых факторов и потребного усилия волочения в зависимости от механических свойств материала и геометрии профиля.

Разработан классификатор возможных технологических процессов в зависимости от величины, направления и закона приложения дополнительных сжимающих усилий, обеспечивающих стесненный изгиб (рис. 1). Представленные в классификаторе процессы стесненного изгиба при волочении листовых профилей описываются 36 схемами.

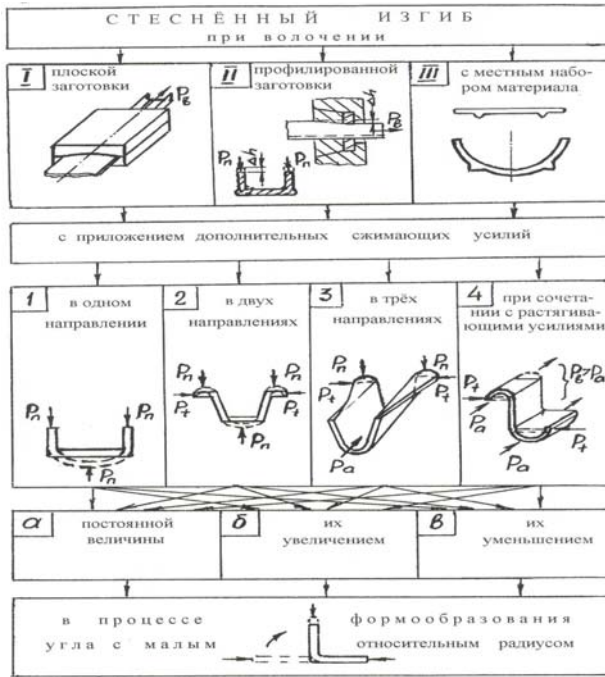


Рис. 1. Классификатор процессов стесненного изгиба профилей при волочении

Регулируя величину P_a можно уменьшить потребное усилие волочения P_e и добиться оптимального влияния аксиальных напряжений σ_a для обеспечения калибровки профиля. Сочетая дополнительные усилия сжатия на отдельных переходах формоизменения деформируемой заготовки с приложением растягивающих усилий (схемы I-4а, II-4б и т.п.), возможно создать технологические процессы одновременного деформирования с предельными степенями и правки в одном формирующем инструменте.

Для определения геометрических параметров зоны сгиба, выбрав декартову систему координат y, x (рис. 2), воспользуемся уравнением, полученным из условия постоянства объема и геометрическими соотношениями. Наиболее общей схемой для представленных в классификаторе процессов является I-1а, соответствующая технологическому процессу изготовления профиля из плоской заготовки с приложением изгибающего момента и непрерывно скользящего сжимающего усилия, равномерно распределенного по требного при формообразовании швеллерообразного профиля.

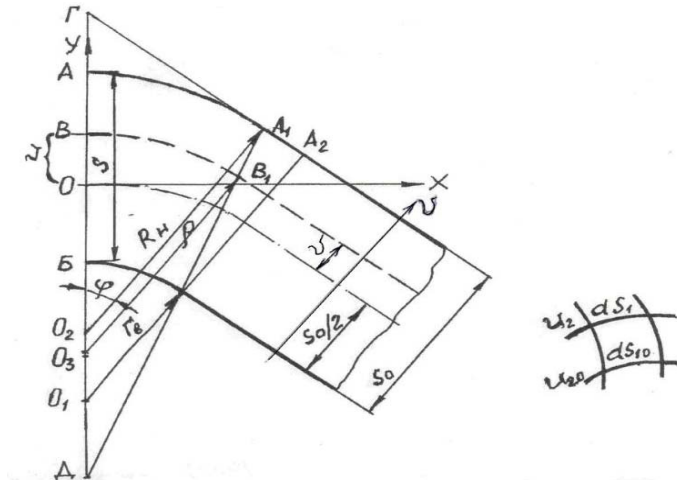


Рис. 2. Определение геометрических параметров зоны сгиба

При этом приняты допущения:

материал идеально-пластичный, ортотропный;

в зоне сгиба принята схема плоской деформации. В процессе гибки наружное волокно только растягивается, внутреннее – только сжимается;

при формообразовании уголкового зоны используется гипотеза ортогональных линий. Продольные линии ширины листа и нормальные к ним остаются ортогональными и после деформации. Ортогональная сетка продольных и поперечных линий совпадает с направлением главных деформаций и напряжений и главных осей анизотропии в каждой точке деформированной области;

продольное волокно зоны сгиба после деформации состоит из дуги окружности и двух примыкающих к ней прямых участков, параллельных недеформированным полкам.

Тогда геометрия зоны сгиба будет описываться уравнением:

$$\eta \cdot \cos \varphi / 2 = 1 - (\bar{R}_H - \bar{r}_B)(1 - \cos \varphi / 2), \quad (1)$$

а ширина заготовки корытообразного профиля (рис. 3):

$$B_3 = 2(B + h \cdot \operatorname{tg} \varphi / 2 - s_0 \cdot \bar{\Delta} l), \quad (2)$$

где $\bar{\Delta} l = 2[(R_H^2 - \bar{r}_B^2)(\operatorname{tg} \varphi / 2 - \varphi / 2) + \operatorname{tg} \varphi / 2]$, $h = H - s_0$,

$\eta = \frac{s}{s_0}$ – утолщение по биссектрисе угла зоны сгиба;

s_0 – исходная толщина заготовки; s – толщина после деформации; $\bar{r}_B = \frac{r_B}{s_0}$,

$\bar{R}_H = \frac{R_H}{s_0}$ – внутренний и наружный относительные радиусы зоны сгиба; φ –

угол гибки; $2B$ – ширина профиля, H – его высота.

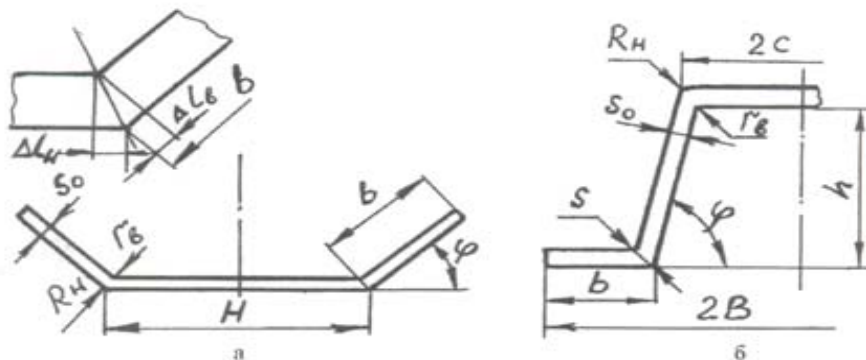


Рис. 3. Геометрические параметры расчета ширины заготовки профилей: а – швеллерного; б – корытообразного

С учетом принятых допущений, геометрии профиля фильеры в зоне формообразования угла, положений теории пластичности, из условия равенства работы внешних и внутренних сил при протягивании ленты на величину длины инструментальной фильеры L (зоны плавного перехода) получены значения усилий:

а) формообразования угла

$$P'_1 = \frac{\pi}{8\sqrt{3}} \cdot \sigma_T \cdot s_0^2 \cdot \eta^2 \left(\frac{1}{k} \ln \frac{1+k}{1-k} - 1 \right), \quad (3)$$

б) деформирования полки профиля при ее ширине b_0 :

$$P''_1 = 2\sigma_T \cdot s_0 \cdot b_0 \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left(1 + \frac{1}{3} \lambda_1 \right) - \frac{1}{2} \sqrt{1 + \lambda_1^2} - \\ & \left[-\frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln(\lambda_1 + \sqrt{1 + \lambda_1^2}) + \frac{1}{16} \cdot \frac{s_0}{b_0} \left[\lambda_1 \sqrt{1 + \lambda_1^2} + \ln(\lambda_1 + \sqrt{1 + \lambda_1^2}) \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

в) на преодоление трения стенки по инструменту:

$$P_c = \frac{\pi}{2} \frac{M_K}{\lambda_1} \cdot f, \quad (5)$$

г) на преодоление трения наружной боковой поверхности полки:

$$P_n = -\frac{\pi}{2} M_K \left[\left(1 + \frac{1}{f^2} \right) \cdot \frac{\ln(1 + f\lambda_1)}{\lambda_1^2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot f} \right], \quad (6)$$

д) на преодоление трения торца полки по инструменту:

$$P_T = 2M_K \frac{1 + \lambda_1^2}{1 - f_1 \lambda_1} \cdot (1,086 - 0,785 f_1) \quad (7)$$

Общее усилие волочения, как сумма (3), (4), (5), (6), (7):

$$P_B = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \sigma_T \cdot s_0^2 \cdot \eta^2 \left(\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{1+k}{1-k} - 1 \right) + \quad (8)$$

$$+ 4\sigma_T \cdot s_0 \cdot b_0 \left\{ \left(1 + \frac{1}{3} \lambda_1 \right) - \frac{1}{2} \sqrt{1 + \lambda_1^2} - \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln(\lambda_1 + \sqrt{1 + \lambda_1^2}) + \frac{1}{16} \cdot \frac{s_0}{b_0} \left[\lambda_1 \sqrt{1 + \lambda_1^2} + \ln(\lambda_1 + \sqrt{1 + \lambda_1^2}) \right] \right\} +$$

$$+ \pi M_K \left\{ \frac{f}{\lambda_1} - \left(1 + \frac{1}{f^2} \right) \cdot \frac{\ln(1 + f\lambda_1)}{\lambda_1^2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot f} + \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{1 + \lambda_1^2}{1 - f_1 \lambda_1} \right) (2,37 - f_1) \right\}$$

где σ_T – предел текучести материала;

$$k = \frac{\bar{R}_H - \bar{r}_B}{\bar{R}_H + \bar{r}_B}, \quad \lambda = \frac{\eta}{\bar{R}_H - \bar{r}_B}, \quad \lambda_1 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_0}{L} - \text{геометрические параметры зоны}$$

сгиба фильеры; M_K – единичный изгибающий момент на биссектрисе угла; f , f_1 – коэффициенты трения соответственно по поверхности и торцу.

При анализе влияния различных факторов на величину потребного усилия волочения установлено:

наиболее значительными являются усилия, требуемые для деформирования полки и преодоления трения торца, которые уменьшаются с ростом длины фильеры L , интенсивность роста P_B растет с увеличением η и f ;

усилие волочения значительно возрастает при $L < 16-20$ мм и при

$$L < \frac{\pi}{2} \cdot b_0 \cdot f_1 \text{ невозможна деформация полки без разрушения;}$$

формообразование профилей необходимо вести при замене трения скольжения на трение качения.

Данные выводы представлены на рис. 4 а,б графическими зависимостями; $\bar{P}_B = f(\eta, f)$, при коэффициенте трения $f = 0,3$ и $P_B = f(L)$ для конкретных условий и подтверждены результатами эксперимента.

На примере формообразования швеллерного профиля исследован процесс его волочения в роликовой фильере, рассматривая при этом осадку усилием P_{OC} (рис. 5).

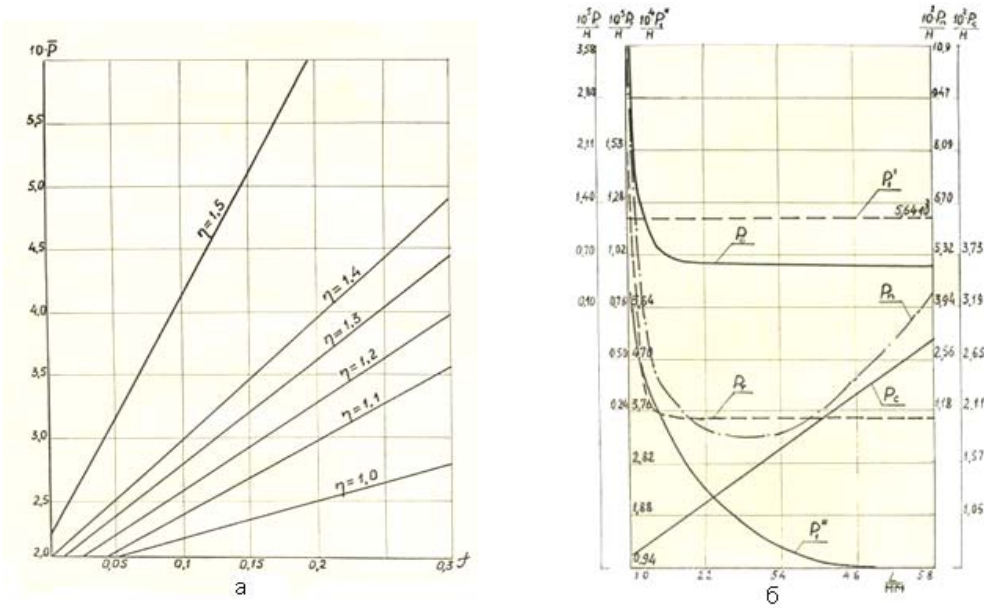


Рис. 4. Графические зависимости усилия волочения швеллерообразного профиля от параметров процесса: а – относительного усилия $\bar{P} = \frac{P_B}{\Phi}$, при

$$\Phi = \frac{4\pi}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_T \cdot s_0 \cdot b_0, \text{ б – значение действующих усилий}$$

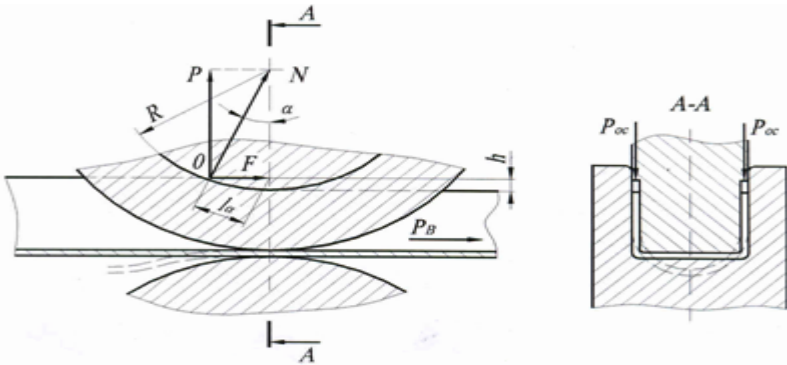


Рис. 5. Формообразование швеллерного профиля в роликовой фильере

При $\eta = 1,0$, что соответствует процессу гибки без утонения материала по зонам сгиба и создает при волочении условия, близкие объемному сжатию, получено усилие осадки:

$$P_{0C} = \frac{\pi}{8\sqrt{3}} \cdot \sigma_T \cdot s_0^2 \cdot \left[\eta^2 \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{1+k}{1-k} - 1 \right) - \left(\frac{1}{k'} \cdot \ln \frac{1+k'}{1-k'} \right) \right], \quad (9)$$

где $k' = \frac{1}{1 + 2\bar{r}_B}$.

В роликовой фильере контактные напряжения меньше, чем в инструментальной, вследствие чего качество поверхности изготовленных профилей выше. Имеется возможность выравнивать напряжения по сечению профиля за счет аксиальной составляющей усилия волочения. Формула для определения усилия волочения профиля типа швеллер в роликовой фильере будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} P_B = & \frac{\varphi_i}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_T \cdot s_0^2 \cdot \eta^2 \left[\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{1+k}{1-k} - 1 \right] + 4\sigma_T \cdot s_0 \cdot b_0 - 2\sigma_T \cdot s_0 \cdot b_0 \cdot \sqrt{1+\lambda_1^2} + \frac{4}{3} \lambda_1^2 \cdot \sigma_T \cdot s_0 \cdot b_0 - \\ & - \frac{2}{\lambda_1} \ln(\lambda_1 + \sqrt{1+\lambda_1^2}) \cdot \sigma_T \cdot s_0 \cdot b_0 + \frac{1}{4} \sigma_T \cdot s_0^2 \cdot \left[\lambda_1 \sqrt{1+\lambda_1^2} + \ln(\lambda_1 + \sqrt{1+\lambda_1^2}) \right] + \\ & + \sigma_T \cdot s_0 \cdot \frac{\sqrt{2R \cdot s_0 - s_0^2}}{R - s_0} \cdot \sqrt{R^2 \cdot \sin^2 \alpha + s_0^2} \end{aligned} \quad (10)$$

где α – угол захвата листовой заготовки вращающейся роликовой парой; φ_i – текущий угол гибки.

Изготовление корытообразного профиля прокаткой-волочением можно представить в виде сочетания обычной гибки (1-2 перехода) с осадкой на малый относительный радиус (3-й переход). Тогда:

$$\begin{aligned} P_B = & \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varphi_i \cdot \sigma_T \cdot s_0^2 \cdot \eta^2 \left[\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{1+k}{1-k} - 1 \right] + 4\sigma_T \cdot s_0 \cdot b_{II} - 2\sigma_T \cdot s_0 \cdot b_{II} \cdot \sqrt{1+\lambda_i^2} - \\ & - \frac{2}{\lambda_1} \ln(\lambda_1 + \sqrt{1+\lambda_1^2}) \cdot \sigma_T \cdot s_0 \cdot b_{II} + 4\sigma_T \cdot s_0 \cdot \frac{H}{\sin \varphi} - 2\sigma_T \cdot s_0 \cdot \frac{H}{\sin \varphi_i} \cdot \sqrt{1+\lambda_i^2} - \\ & - \frac{2}{\lambda_i} \ln(\lambda_i + \sqrt{1+\lambda_i^2}) \cdot \sigma_T \cdot s_0 \cdot \frac{H}{\sin \varphi_i} + \frac{1}{4} \cdot \sigma_T \cdot s_0^2 \left[\sqrt{1+\lambda_i^2} + \ln(\lambda_i + \sqrt{1+\lambda_i^2}) \right] + \\ & + \frac{4}{3} \lambda_i^2 \cdot \sigma_T \cdot s_0 \cdot \frac{H}{\sin \varphi_i} + \sigma_T \cdot s_0 \cdot \frac{\sqrt{2R \cdot s_0 - s_0^2}}{R - s_0} \cdot \sqrt{R^2 \cdot \sin^2 \alpha + s_0^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где b_{II} – ширина полки корытообразного профиля, λ_i, λ_1 – характеризует геометрию профиля; H – высота профиля.

Формулы для определения усилий волочения справедливы при величине зазора в роликах $h = s_0$ или несколько большем, что соответствует реальным условиям деформирования листовой заготовки при волочении в условиях стесненного изгиба.

Используя расчеты формул (10) и (11) в Microsoft Excel построены графики зависимостей полного усилия волочения P_B различных видов профилей от толщины используемого материала s_0 при $\sigma_T=500$ МПа; $\eta=1,1$; $b_0=b_{II}=H=20$ мм; $f_i = 0,3$; $\varphi_i = 90^\circ$ (рис. 6), что соответствует реальным условиям деформирования титановых и алюминийево-литиевых сплавов на разработанных установках типа ВПУ-120/7,5, ВПУ-150/7,0, экспериментальной установке ВПУ-170 на базе волочильного стана ЦС-28 и т.д.

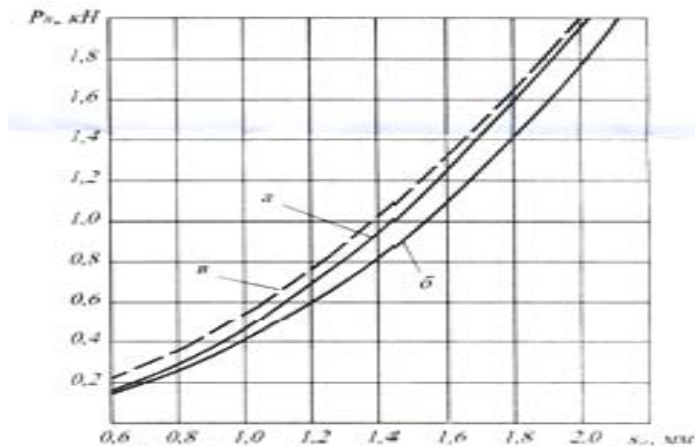
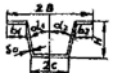






Рис. 6. Графические зависимости усилий волочения P_B от толщины материала s_0 : а – корытообразного; б – швеллерного; в – швеллерного (экспериментальные данные)

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований по установлению основных технологических параметров изготовления профилей гибкой-волочением. В связи с выполнением работы в разных производственных условиях и лабораториях, эксперименты проводились с широкой номенклатурой профилей и материалов. Исследуемые профили сгруппированы и представлены в таблице 1. Для выполнения поставленных задач использовалось как производственное оборудование предприятий, так и разработанное специализированное оборудование с изготовлением большого количества формирующей оснастки. Роликовая оснастка, обеспечивающая их работу представлена на рис.7. Для сравнения полученных аналитических зависимостей и результатов экспериментов были изготовлены инструментальная фильера длиной $L_\varphi=90$ мм, соответственно под-

гибке на 1 градус на длине 1 мм (рис. 8а), и трехпарнороликовая фильера (рис. 8б), позволяющая вести настройку на толщину 0,5-2,5 мм.

Таблица 1. Параметры исследуемых профилей из листовых заготовок различных материалов.

№ гр	Параметры-профилей	Материал	s_0	$2B$	$2c$	H	α , град	b	b_δ	\bar{r}_B	\bar{R}_H
А		1451, 1430, 1460, ВТ1, Д16, АМг6, ВНС-2, 20Х13Н4 Г9, АБМ-1, ВТ16	0,5-2,0	40-96	10-40	10-50	25-0	10-22	-	0,5-1,2	0,2-1,8
Б		Д16, 1451, 1430, 1460	1,2-2,5	36-80	20-40	18-50	-	12-22	4-6	0,8-1,6	0,5-1,6
В		Д16, 1430, 1451, 1460	1,2-2,0	30-45	-	20-50	-	10-25	4-6	0,8-1,5	0,5-1,5
Г		Д16, АМг6, ВТ1, АБМ4, ОТ4-1, ОТ4	0,8-1,8	-	-	15-40	-	10-20	-	0,5-1,6	0,5-1,6
Д		Д16, ВТ1, ОТ4-1, ОТ4	0,6-2,0	-	-	-	-	10-25	-	0,6-1,2	0,5-1,0

Большой запланированный объем экспериментов потребовал разработки целого ряда методик. Методикой установлено проведение следующих замеров при экспериментах:

параметров профилируемой заготовки B_3 , S_0 , отклонений $\Delta B_3, \Delta S_0$, площади сечения $f_{сеч}$;

параметров рабочего контура роликового инструмента; зазора между рабочими поверхностями роликов окончательного формообразования при настройке на заданную толщину S_0 ;

длины участка зоны плавного перехода L перед каждой роликовой парой; скорости профилирования v – через время формообразования профиля (по секундомеру);

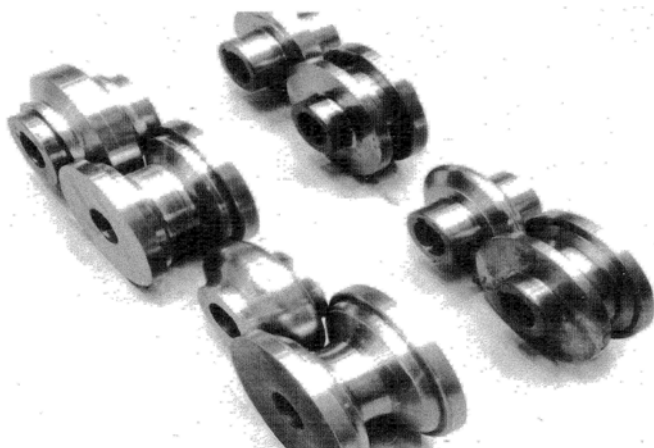


Рис. 7. Комплекты роликов предварительного и окончательного Формообразования

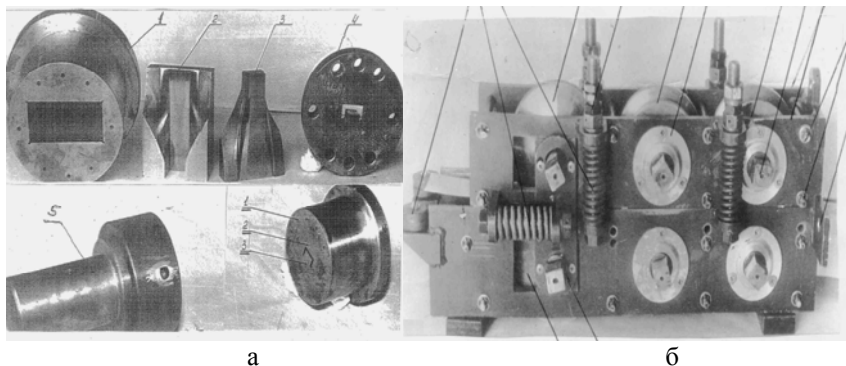


Рис. 8. Экспериментальные фильеры для оценки аналитических зависимостей:
а – инструментальная; б – фильера трехпарнораликовая.

радиальных усилий (волочения) P_B , обеспечивающих прохождение заготовки через формирующие ролики;

геометрии сечений профилей: \bar{r}_B , \bar{R}_H , толщины по всем элементам профиля s_n , s_c , s (полки, стенки, зоны сгиба и др.);

удлинения профилей Δl , поперечного сечения ψ , относительного удлинения δ ; R_{u3} при гибке профиля;

силовых параметров при испытании образцов, вырезанных из разных элементов профиля: усилия разрыва P_p и напряжений σ_6 ; значений $P_{0,2}$ и $\sigma_{0,2}$;

температурных показателей при отработке термомеханических параметров процесса;

структуры материала при разных степенях деформаций, микротвердости H_{μ} и т.д. при проведении металлографических исследований.

Чтобы уменьшить расход материала при исследовании предельных возможностей процесса, заготовки рубились переменной ширины с разницей по концам до 2,0-2,5 мм. Это позволило на заготовке длиной 600-800 мм создавать разные утолщения η и проводить до 5-6 замеров параметров сечения.

Все результаты исследований заносились в таблицы, а полученные зависимости параметров изображались графически.

Изготовленные профили осматривались визуально, затем производились указанные выше замеры, готовились образцы для испытаний, причем, подбирались профили с малыми, средними и большими значениями коэффициента избытка материала по ширине $\kappa = B_3/B_T$. По деформациям координатной сетки производилась оценка деформационного состояния материала по зонам сгиба и длине профиля.

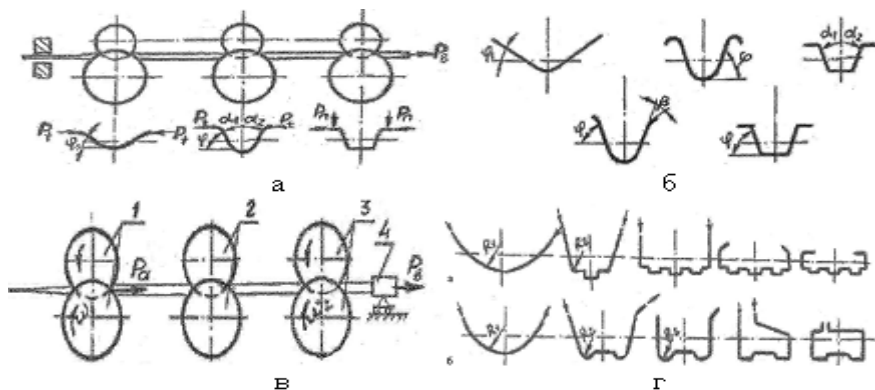


Рис. 9. Схемы формообразования исследуемых профилей из листа:

а – в замкнутом рабочем контуре; б – при чередовании приводных и свободно вращающихся роликовых пар; в – при сочетании процессов волочения и прокатки; г – по интенсивной технологии.

Прежде чем проводить отработку параметров технологического процесса и профилей, следовало оптимизировать схемы формообразования для каждой группы приведенных в табл. 1 профилей. На рис. 9 представлены отработанные схемы формообразования в роликовых фильерах при волочении и сочетании волочения с прокаткой.

Результаты проведенных экспериментов представлены графическими зависимостями, например, при формообразовании швеллерного профиля в роликовой фильере (рис. 10а, б, в), при сочетании процессов волочения и прокатки (рис. 11). Для расчета ширины заготовки B_3 построена номограмма (рис. 12), в зависимости

от параметров профиля (s_0, H) и угла гибки φ , удобная для условий производства. Для учета запаса материала на аксиальную вытяжку, утолщения полок экспериментально отработаны корректировочные для B_3 коэффициенты k_a, k_n (рис. 13а, б).

С учетом k_a, k_n различие полученной по номограмме B_3 и полученных аналитических зависимостей не превышает 5-6%. На этом же рис. 13в приводится взаимосвязь основных параметров формообразования корытообразных профилей. Так данные по определению B_3 разнятся в пределах 2,5-3,5%.

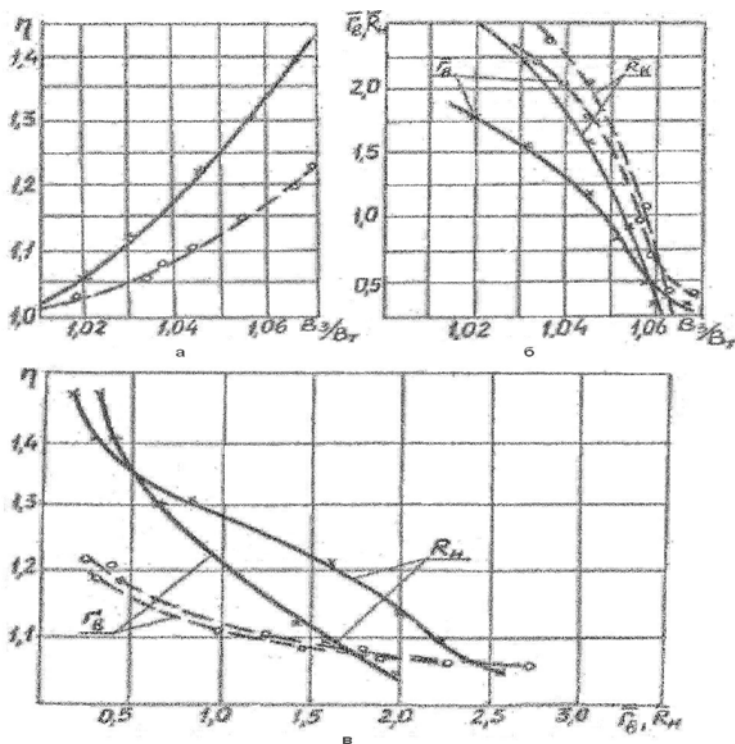


Рис. 10. Графические закономерности параметров процесса формообразования швеллерного профиля в роликовой фильере:

а – изменение утолщения $\eta = f(B_3/B_T)$; б – изменение относительных радиусов $\bar{r}_B = f(B_3/B_T)$, $\bar{R}_H = f(B_3/B_T)$; в – взаимосвязь параметров $\bar{r}_B, \bar{R}_H, \eta$

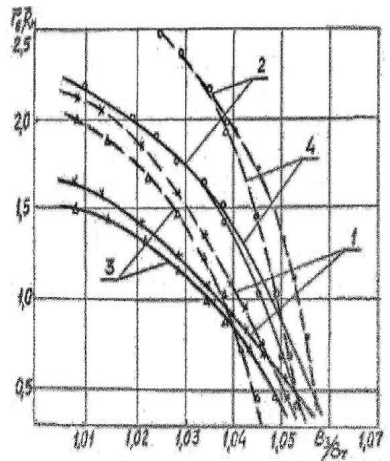
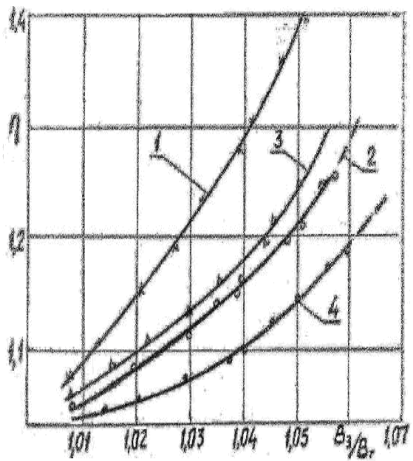


Рис. 11. Графики зависимости параметров процесса формообразования профилей при сочетании волочения и прокатки

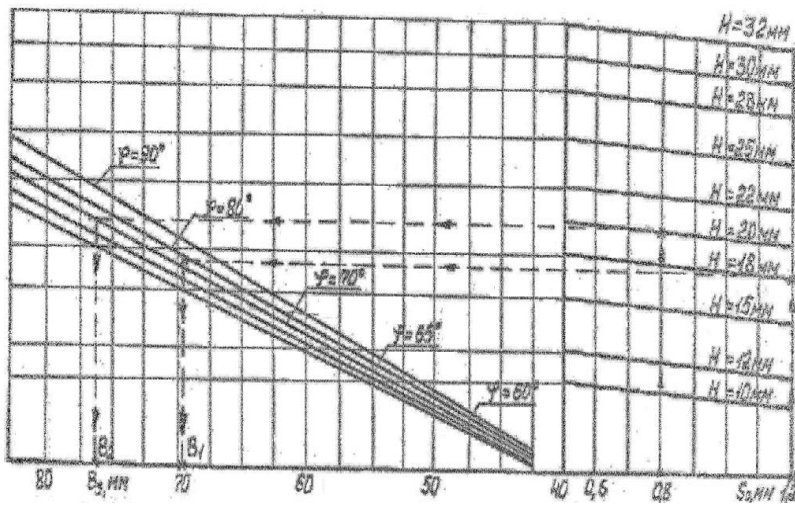


Рис. 12. Номограмма для определения ширины заготовки в зависимости от параметров профиля $B_3 = f(s_0, H, \varphi)$

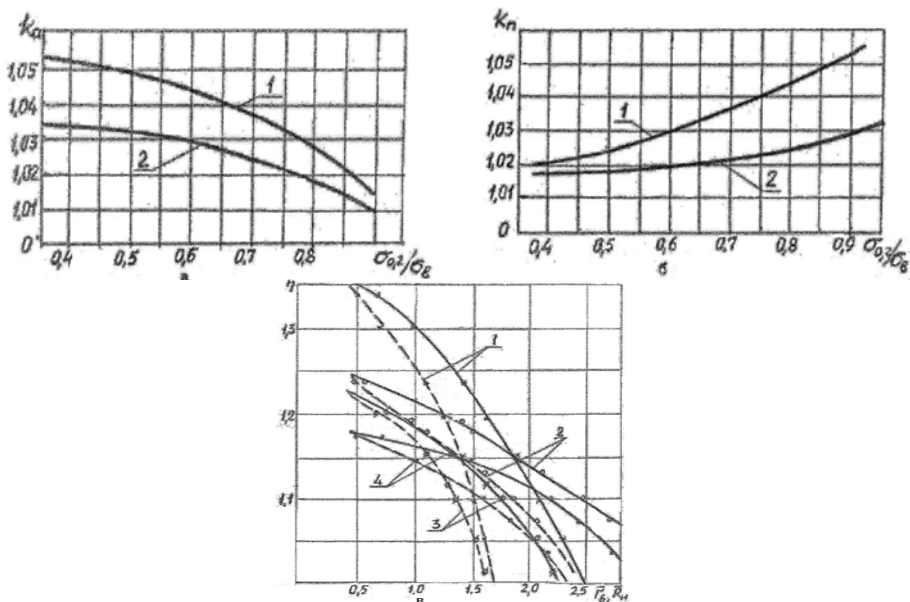


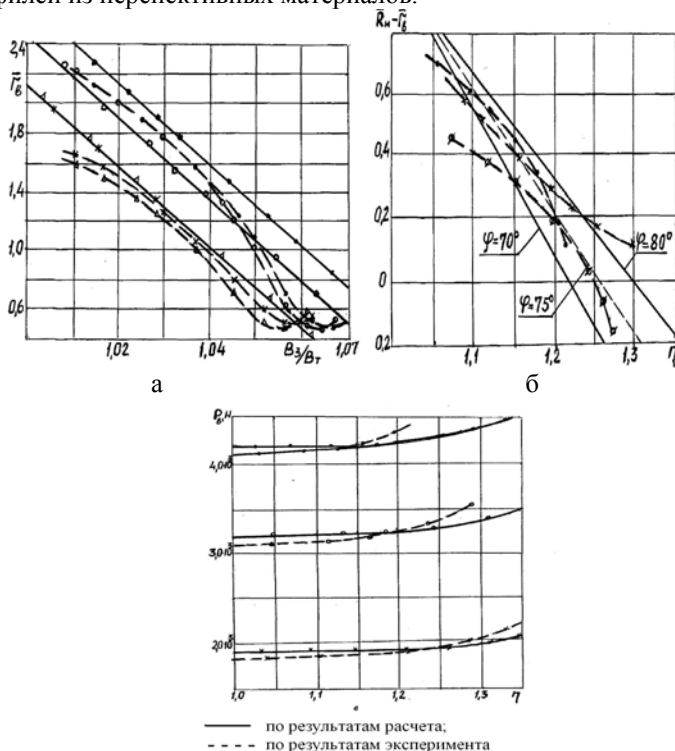
Рис. 13. Экспериментальные графики зависимости: а – учитывает аксиальную вытяжку; б – учитывает утолщение полки; 1 – при волочении; 2 – при сочетании волочения с прокаткой; в – взаимосвязь технологических параметров формообразования корытообразных профилей

Графики $\bar{r} = f(B_3/B_T)$ (рис. 14а) разнятся до 15-18% лишь при малых и больших утолщениях, а при рекомендованных для производства η сходимость результатов в пределах 2,5-3,0%. Данные \bar{R}_H по графику и подсчитанные по формуле $\bar{R}_H = \bar{r}_B + \frac{1 - \eta \cos \varphi / 2}{1 - \cos \varphi / 2}$ при $\eta = 1,05 - 1,30$ в зависимости от марки металла имеют сходимость 12-15%.

Сравнение данных по замеру усилий волочения и подсчитанные по формуле (11) при формообразовании корытных профилей в интервале η , гарантирующих бездефектность зоны сгиба, дает сходимость до 18-20%, а в интервале $\eta \approx \eta_{opt}$ разница не превышает 6-8%.

Глава четвертая посвящена разработке технологических процессов изготовления гнутых профилей и гофров повышенной жесткости волочением-прокаткой в условиях стесненного изгиба. Ее можно представить как бы двумя самостоятельными частями: процессы изготовления тонкостенных профилей из традиционных авиационных материалов, типовыми представителями которых, исходя из потребностей производства, выбраны Д16, Титановые сплавы ОТ4-1 и

ОТ4, нержавеющей стали 20Х13Н4Г9Н и ВНС-2, и вопросы технологии изготовления профилей из перспективных материалов.



в

Рис. 14. Сравнение теоретических и экспериментальных данных процесса волочения профиля из различных материалов: а – по относительному внутреннему радиусу $\bar{r} = f(B_3/B_T)$; б – по сравнению относительных радиусов

$$\bar{R}_H - \bar{r}_B = f(\eta); \text{ в – по усилию волочения.}$$

Качество изготавливаемых профилей, прежде всего, определяется оптимальностью схемы формообразования, что рассмотрено в главе три, и качеством изготовления формующего инструмента, особенно при создании условий стесненного изгиба и калибровке, точность их изготовления должна быть не ниже 6-7 клв, проверяемых на универсальном микроскопе УИМ-23. Порядок проектирования и их изготовления даны в утвержденных методических материалах. Соответственно требованиям к формующему инструменту установлены условия, которым должны удовлетворять изготавливаемые в них профили. Гарантировать выполнение установленных к профилям требований можно при раскросе заготовок с точ-

ностью $B_3 \pm 0,2 \text{ мм}$, создании аксиальных растягивающих напряжений при калибровке, превышающих предел текучести материала не менее, чем на 2-3%.

Проведенные исследования позволили установить, что для осуществления разработанных технологических процессов необходимо специализированное волочильно-прокатное оборудование.

Промышленное изготовление профилей при их волочении в роликовых фильерах с использованием протяжных станков было признано нецелесообразным из-за низкой экономичности и невозможности получения профилей неограниченной длины. Для опытной отработки технологического процесса была разработана и изготовлена волочильно-прокатная установка модели ВПУ-120/5,5, впоследствии модернизированная в ВПУ-120/7,0 и ВПУ-120/7,5 для промышленного внедрения.

Изготовление профилей из перспективных материалов. При обработке промышленной технологии изготовления профилей из алюминийево-бериллиево-магниевого сплава АБМ1 использовались установленные в результате экспериментов температурно-скоростные режимы процесса со снижением температуры от $t=580-600^\circ\text{C}$ в печи скоростного нагрева до $200-220^\circ\text{C}$ в навесной электропечи, установленной на формующем агрегате. Результаты всех замеров приводятся в таблицах и отражены графически. Для определения деформации наружного волокна зоны сгиба построена номограмма. По результатам исследований изданы ТР 1.4.1784-87.

Отработка технологии изготовления профилей из алюминийево-литиевых сплавов (1450, 1451, 1420, 1430, 1441, 1460) проводилась с исследованием нескольких режимов низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО) из свежезакаленных и отожженных заготовок, а также в исходном состоянии (по сертификату поставки) при разных режимах термической обработки и правки растяжением. Причем правка проводилась как после формообразования профиля, так и после повторной закалки в зависимости от марки металла, в пределах остаточной деформации $\xi = \frac{\Delta l}{l} = 1,4 - 4,5\%$. Выбранные режимы искусственного

старения (ИС) и правки позволили повысить несущую способность изготовленных профилей. Так для сплава 1430 при правке растяжением, близкой к оптимальной $\xi=2,5-4,0\%$, были повышены σ_6 на 60-80 МПа, а при использовании оптимального двухступенчатого режима ИС σ_6 повышена была на 150-160 МПа. При работе на продольный изгиб был рекомендован режим ИС $t_1=215\pm 5^\circ\text{C}$, выдержка 1 час; $t_2=150\pm 5^\circ\text{C}$, выдержка 20 часов.

В пятой главе рассматриваются вопросы разработки средств технологического оснащения новых методов изготовления тонкостенных профилей. Предлагаются технические условия на изготовление профилей, установлены факторы, определяющие их качественные характеристики, взаимосвязь структуры и технологических факторов.

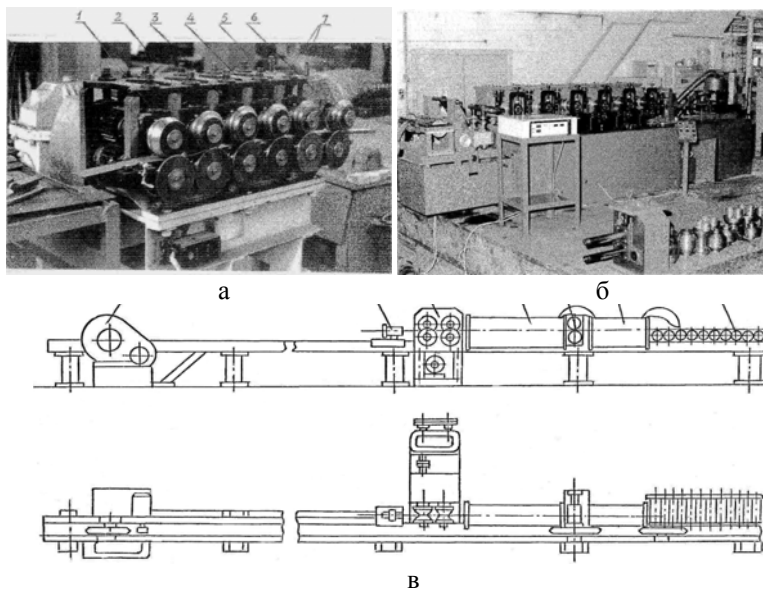


Рис. 15. Специализированное оборудование для изготовления гнутолистовых профилей: а – волочильно-прокатная установка ВПУ-120/7,5; б – гибочно-прокатный станок ГПС-200М6; в – опытно-промышленная прокатно-волочильная установка

Разработаны технические условия на проектирование специализированного волочильно-прокатного оборудования, технологических процессов и средств их оснащения; приводятся примеры оборудования, разработанного с участием автора или непосредственно под его научным руководством. Волочильно-прокатная установка модели ВПУ-120/7,5 (рис. 15,а), гибочно-прокатный станок ГПС (рис.15,б), обеспечивающая изготовление в холодном состоянии профилей из труднодеформируемых металлов за счет создания осевого подпора при разных линейных скоростях профилирования в рабочих клетях и условий гибки-волочения; опытно-промышленная установка для формообразования профилей из сплавов АБМ1, АБМ4 (рис. 15,в); предусматривается использование разработанного оборудования в составе автоматизированных линий (патенты № 2084634, 2269392). Для изготовления гофров разработан станок СФГ-1 (рис. 16).

Шестая глава посвящена конструктивно-технологическому совершенствованию летательных аппаратов за счет применения гнутых профилей и перспективных материалов.

Если за критерий достаточности прочности конструкции можно принять расчет на разрушающие нагрузки, то для определения достаточного уровня жесткости приходится оценивать целый ряд эксплуатационных факторов, чтобы обеспечить сохранение аэродинамических форм самолета, не нарушить кинематику механических элементов управления навесными агрегатами, источников

возникновения опасных аэроупругих явлений и т.д. Поэтому в нормах жесткости регламентируется значение допустимых деформаций: прогиб y_{max} , углы крутки φ_{max} , значение критических скоростей $v_{кр} > v_{max}$ и др.

Ставя задачу по совершенствованию конструкций ЛА за счет применения гнутых профилей и новых материалов необходимо провести оценку их работоспособности. Поэтому все профили из алюминийно-бериллиевых и литиевых сплавов проходили испытания на местную и общую потерю устойчивости (табл. 2). Корытообразные профили из Al-Li сплавов, например из 1451 превышали по жесткостным характеристикам такие же профили из Д16АТ в среднем на 35-40 %, из сплава 1430Т1 – на 30-35 %. Преимущества профилей из АБМ1 ещё выше за счет разницы в массовой плотности на 18%. Так профили из АБМ1 при длине образца 115 мм имели $\sigma_{кр} = 422$ МПа, а такой же из Д16чТ1 – $\sigma_{кр} = 244$ МПа.

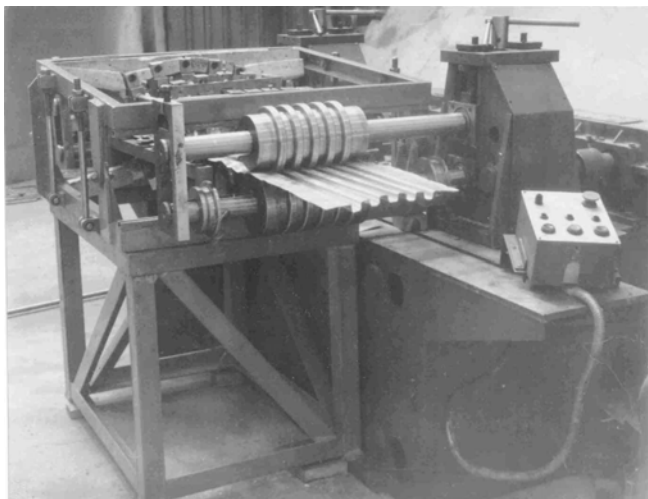


Рис. 16. Станок формообразования гофров СФГ-1

Оценку работоспособности исследованных профилей дают результаты рис. 18.

При проведении испытаний на продольный изгиб фиксировались усилия продольного сжатия $P_{сж}$; усилия, соответствующие местной потери устойчивости стенки, полки и фланцев $P_{кр}$ мест; усилие общей потери устойчивости $P_{кр}$, что позволило построить графические зависимости $\sigma_{кр} = f(L/s_0)$ элементов профилей из Д16АТ, ОТ4-1, ОТ4 и ВНС-2, как приводится на рис. 17.

Таблица 2. Результаты (обобщенные) механических испытаний на устойчивость образцов гнутых корытообразных профилей $L \sim 120$ мм и $L \sim 300$ мм из различных материалов.

Марка материала	Толщина s_0 , мм	Длина L , мм	Характеристики профиля				Примечание
			$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$\sigma_{кр}$, МПа	
АБМ1	1,2	115	500	398	-	422	Утолщение $\eta \sim 1,26$
Д16Т1	1,2	115	388	293	-	244	$\eta \sim 1,25$
1451Т1	1,65	113	490	462	8,4	388	правка, 2,6%, перезакалка
-“-	1,65	292	493	458	8,8	245	-“- 4,8%
1451Т1	1,67	113	515	472	8,4	398	без перезакалки, правка 1,1%
-“-	1,65	120	530	490	8,3	393	-“- 1,8%
1451Т1	1,64	112	492	453	9,5	442	из отожж. загог.правка
1451Т1	1,62	113	489	456	9,2	423	2,6%
1451Т1	1,62	292	487	457	9,2	201	-“- 2,3
1451Т1	1,64	292	493	452	9,2	241	-“- 2,6
Д16АГ	1,69	293	-	-	-	165	ЕС,правка 1,5%
-“-	1,69	291	-	-	-	188	-“- 2,8%
-“-	1,82	120	-	-	-	273	-“- 3,9%
-“-	1,86	120	-	-	-	265	-“- 3,4%
-“-	1,67	292	-	-	-	156	-“- 3,2%
1430Т1	1,86	130	463	382	12,3	321	правка 2,2%
-“-	1,77	124	494	448	8,9	355	без перезак. -“- 1,8%
-“-	1,09	113	479	419	11,3	338	перезакалка правка 2,8%
-“-	1,74	297	485	411	10,2	209	-“- 4,6%
1460Т1	1,68	120	480	450	8,2	368	без перезак. -“- 2,8%
1460Т1	1,66	120	490	450	8,9	361	-“- 1,8%

При отработке технологии испытаний экспериментальных панелей была получена опытно-промышленная партия профилей из 1451, 1430, Д16 и американского сплава, содержащего Li, 6013. Из них были изготовлены панели клепанной, сварной и клеесварной конструкции. Работоспособность таких панелей представлена диаграммами рис. 19.

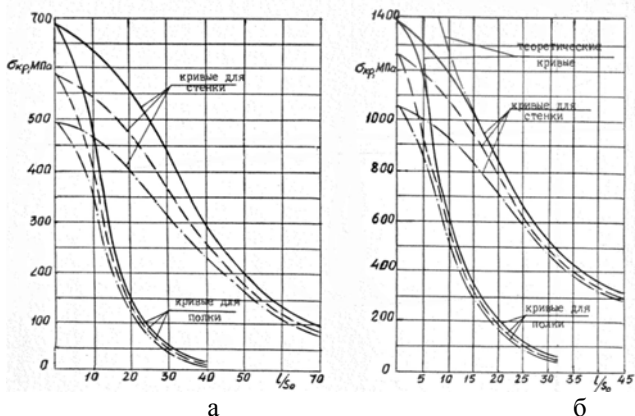


Рис. 17. Графические зависимости $\sigma_{кр}$ элементов профилей из ОТ4-1 (а), ВНС-2 (б)

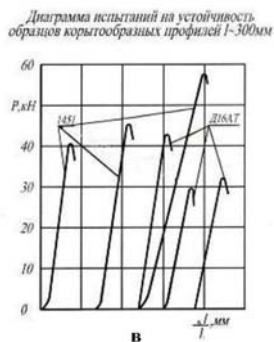
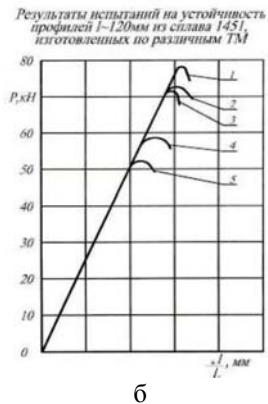
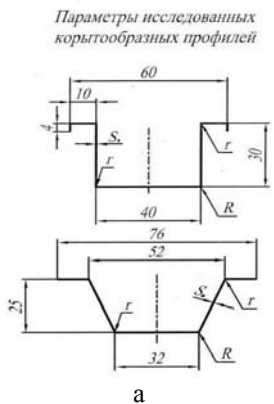
При этом обрабатывались режимы сварки и клеесварки Al-Li сплавов, что также исследовалось впервые, было изготовлено по 10-14 образцов-свидетелей каждой марки материала. Разброс полученных результатов в среднем не превышал 5-8%, что дает основания для конструктивно-технологического совершенствования ЛА за счет алюминиево-литиевых сплавов.

Результаты испытаний панелей на устойчивость показывают, что клепаные конструкции необходимо заменять клеесварными. Средние значения критических напряжений панели тех же размеров клепаной конструкции с обшивкой из Д16АТ и стрингерами из сплава 1430Т1 составили 176,5 МПа, из сплава 1430Т1-189 МПа, из сплава 1451-245 МПа. Средние значения критических напряжений клеесварных панелей для сплава 1430 оказались равными 229 МПа, или на 26,5 % выше, из сплава 1451-317 МПа или на 29,4 % выше, чем у клепаных.

Таким образом, повышение прочностных характеристик клеесварных панелей из алюминиево-литиевых сплавов в среднем на 25% позволит уменьшить расчетные сечения обшивки и стрингеров, что дополнительно снизит массу аэрокосмических аппаратов.

В работе приводятся результаты испытаний на устойчивость панелей с профилями из АБМ из типовых авиационных материалов, даны рекомендации по их оптимальным параметрам.

Приводится технико-экономическая эффективность использования результатов работы, пути дальнейшего развития и соответствующие выводы.



Технологические маршруты:

- 1 – Тсз – Ф – Пр – С₄
- 2 – Тсз – Ф – Пр – С₁
- 3 – Тсз – Ф – Тсз – Пр – С₄
- 4 – Тсз – Ф – тес – Тсз
- 5 – Тсз – Ф – тес – Тсз

Рис. 18. Исследованные профили, изготовленные при разных режимах НТМО, (а) и результаты их испытаний на устойчивость (б, в)

Оценка работоспособности панельных конструкций, изготовленных по различным технологиям

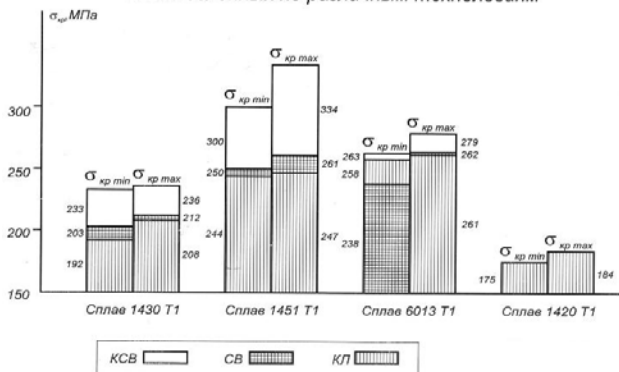


Рис. 19.

Заключение. Анализ конструкций основных агрегатов планера летательных аппаратов выявил наличие значительной номенклатуры тонкостенных профилей, гофров и тонколистовых деталей, выполненных гибкой. Из-за утонения металла и больших относительных радиусов по зонам сгиба их жесткостные характеристики не позволяют полностью использовать механические свойства металла. Для повышения жесткости деталей, гнутых из листа, необходимо вести гибку на малые относительные радиусы, обеспечивая сечение зоны сгиба эквивалентно прессованному профилю.

Решить данную задачу позволяет метод стесненного изгиба, когда гибку ведут в условиях сжато-напряженного состояния металла в очаге деформаций с обеспечением локального утолщения деталей по зонам сгиба.

В работе рассматриваются пути изготовления тонкостенных профилей и гофров при гибке-волочении, исследуются математические зависимости параметров процесса формообразования листовых заготовок из традиционных и перспективных металлов в профиль. Проводится экспериментальная отработка технологических процессов изготовления профилей и гофров. Разработаны технологии их промышленного изготовления и оборудование для реализации рекомендованных методов, приводятся результаты использования проведенных исследований в промышленности.

Основные результаты и выводы по работе:

1. Решена научно-техническая проблема изготовления подкрепляющего набора оболочковых конструкций летательных аппаратов при волочении и сочетании волочения с прокаткой в условиях стесненного изгиба, доказаны преимущества данного метода по сравнению с существующими. Разработан классификатор процессов, позволяющий выбрать физическую модель и схему формообразования листовой заготовки в профиль и гофр, установить напряженно-деформированное состояние металла в зоне сгиба.

2. Выбрана в соответствии с классификатором для теоретических исследований обобщенная модель процесса, которая позволила получить из условия равенства работы внутренних и внешних сил уравнения для определения потребного усилия волочения при формообразовании гнутых профилей в зависимости от механических свойств материала, параметров процесса и геометрии профиля. Получены аналитические зависимости создания аксиального сжатия с учетом схемы формообразования и величины зазора в формирующем роликовом инструменте, что дает возможность определить настроечные параметры оборудования.

3. В соответствии с разработанной методикой проведен комплекс экспериментов по отработке параметров технологического процесса при холодной и горячей деформациях, построены графические их зависимости. Установлены предельные возможности процесса формообразования, рекомендованы для промышленного изготовления профилей внутренние относительные радиусы по зонам сгиба (0,5-1,2) исходной толщины, утолщения $\eta = 1,20-1,35$ для пластичных и $\eta = 1,09-1,25$ для низкопластичных металлов в зависимости от механических

свойств исходной заготовки. Сходимость данных экспериментов и аналитических зависимостей в пределах до 15-20 %.

4. Построена номограмма для определения ширины исходной заготовки B_3 при различных углах гибки, толщине s_0 , высоте профиля H до 30 мм. Экспериментально отработаны коэффициенты корректировки B_3 для учета аксиальной вытяжки и утолщения полки профиля, зависящие от механических свойств деформируемого металла.

5. Разработана методика проектирования и изготовления формирующего роликового инструмента. Изданы ММ 1.4.1951-89, используемые на предприятиях, занимающихся изготовлением профилей из листовых заготовок.

6. Экспериментально отработан новый технологический процесс изготовления волочением и при сочетании волочения с прокаткой в роликовых устройствах профилей из труднодеформируемых алюминиевых, в том числе литиевых и бериллиевых, титановых сплавов и нержавеющей сталей, при холодной и горячей деформациях с использованием термомеханической обработки. Качество профилей установлено при металлографических исследованиях с обеспечением точности по 8-10 квал.

7. Отработаны и рекомендованы для промышленного производства технологические процессы изготовления волочением тонкостенных профилей из алюминивно-литиевых сплавов 1451, 1430, алюминивно-бериллиевых из сплава АБМ1. Для их использования утверждены технологические рекомендации ТР 1.4-2023-90 и 1.4.1784-87.

8. Исследованием микротвердости холодноволооченных профилей установлено повышение их прочности на 9,5-20% в зависимости от марки материала без снижения пластичности.

9. Сравнительные механические испытания профилей и образцов панелей на местную и общую потерю устойчивости подтвердили, что за счет повышения жесткости и прочности полученные волочением при стесненном изгибе профили позволяют снизить массу панельных конструкций летательных аппаратов на 10-12%.

10. Разработана, изготовлена и внедрена в промышленность оригинальная волочительно-прокатная установка ВПУ-120/7,5, обеспечивающая изготовление в холодном состоянии тонкостенных профилей авиационных конструкций волочением, прокаткой и при сочетании данных процессов с созданием одновременно тангенциальных, нормальных и аксиальных сжимающих усилий, калибровки растяжением и гибки готового профиля по радиусу.

11. На базе промышленного волочительного стана ЦС-28 разработана конструкция опытно-промышленной установки для изготовления профилей из алюминивно-бериллиевых сплавов в условиях горячей деформации с использованием термомеханической обработки.

12. Разработана автоматизированная линия изготовления тонкостенных профилей широкой номенклатуры из различных труднодеформируемых авиационных материалов.

13. Результаты работы внедрены на Комсомольском-на-Амуре авиационном производственном объединении им. Ю.А. Гагарина, НПО «Молния», ОАО «Ульяновский НИАТ» и др., с экономическим эффектом в прежнем исчислении более 1,0 млн.рублей.

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных вышней аттестационной комиссией:

1. Колганов И.М. Проскураков Г.В. Колганов В.И. Формообразование листовых профилей повышенной жесткости при волочении // Кузнечно-штамповочное производство, 1982, № 5. – С. 21-23.

2. Колганов И.М. Проскураков Г.В. Формообразование листовых профилей стесненным изгибом при сочетании процессов волочения и прокатки // Авиационная промышленность, 1983, № 1, – С. 40-41.

3. Колганов И.М. Изготовление панелей с гнутыми профилями из перспективных алюминиевых сплавов / И.М. Колганов, А.С. Башилов, Б.В. Богданов. // Авиационная промышленность, 1994, № 9-10. – С. 3-5.

4. Патент № 20427.35. РФ МКИ, С 22 F1/04. Способ термомеханической обработки листовых алюминиевых сплавов / И.М. Колганов, А.С. Москвин, М.П. Федорченко. Оpubл. Б.И., 1995, № 24.

5. Патент № 2083306, РФ МКИ В 21 D 26/12, В 21 J 9/06. Электрогидравлический вибратор ударного действия / И.М. Колганов, И.Н. Сорокин, М.Ю. Савин, В.В. Стец. Оpubл. Б.И., 1997, № 19.

6. Колганов И.М. Повышение несущей способности панельных конструкций ЛА с профилями, гнутыми из листа / И.М. Колганов, Н.А. Щавлева, С.В. Филимонов. // Авиационная промышленность, 1999, № 3. – С. 9-12.

7. Колганов И.М. Повышение конкурентоспособности отечественной авиатехники путем внедрения алюминиево-литиевых сплавов и рационального выбора ТМО. / И.М. Колганов, П.Ю. Пакшин, А.С. Башилов. // Авиационная промышленность, 2001, № 1. – С. 11-14.

8. Колганов И.М. Исследование математических зависимостей параметров процесса стесненного изгиба при профилировании тонколистовых заготовок. / И.М. Колганов, П.Н. Куприн, П.Ю. Пакшин. // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань: КГТУ, 2003, №2. – С. 51-54.

9. Колганов И.М., Куприн П.Н. Оптимизация основных параметров гибочно-прокатных станков // Авиационная промышленность, 2003, № 3. – С. 53-55.

10. Колганов И.М., Тюнькин А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки методом конечных элементов при формировании гнутолистового профиля стесненным изгибом. // Авиационная промышленность, 2004, № 1. – С. 34-37.

11. Колганов И.М. Влияние кривизны бурта формирующего роликового инструмента на качество профиля / И.М. Колганов, К.В. Турундаев, М.В. Илюшкин. // Авиационная промышленность, 2005, № 3. – С. 35-37.

12. Колганов И.М. Исследование процесса стесненного изгиба при профилировании тонколистовых заготовок /И.М. Колганов, П.Н. Куприн, П.Ю. Пакшин. // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань: КГТУ, 2005, № 3. – С. 55-58.

13. Колганов И.М., Пакшин П.Ю. Исследование силовых факторов формообразования гнутолистовых профилей в роликовом стане. // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань: КГТУ, 2006, № 2. – С. 48-51.

14. Абаськин А.Г., Колганов И.М. Проект самолета-автомобиля на базе сквозного курсового проектирования с использованием разрабатываемых изобретений // Известия Самарского научного центра РАН. Т.1. – Самара: 2007. – С. 7-11.

15. Колганов И.М. Направления интенсификации процесса изготовления тонкостенных профилей и повышение качества летательных аппаратов / Сборник статей: "50 лет содружества науки УлГТУ и машиностроения". //Известия Самарского научного центра РАН. Т.3. – Самара: 2007. – С. 132-140.

в других изданиях:

16. Колганов И.М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования (монография). – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 108 с.

17. Колганов И.М., Проскуряков Г.В. Теоретические исследования процесса формообразования профилей стесненным изгибом при волочении. – Тольятти, 1979. – 16 с. / Рукопись предоставлена Тольяттинским политехническим институтом. Деп. рук. в ВИНТИ 15 февраля 1979, Д № 1093-79.

18. Колганов И.М. Проскуряков Г.В. Исследование процесса формообразования профилей стесненным изгибом в инструментальном фильере. – Тольятти, 1979. – 9 с. / Рукопись предоставлена Тольяттинским политехническим институтом. Деп. рук. в ВИНТИ, 15 февраля 1979, Д № 1096-79.

19. Колганов И.М. Классификация процессов стесненного изгиба при волочении листовых профилей. – Комсомольск-на-Амуре, 1982. – 7 с. / Рукопись предоставлена Новосибирским филиалом научно-исследовательского института технологии и организации производства (НИАТ). Деп.рук. ЦНТИ «Волна», 15 ноября 1982, Д № 05350.

20. Колганов И.М. Изменение механических свойств в металле при формообразовании листовых профилей стесненным изгибом в роликовых фильерах. – Новосибирск, 1983. – 17 с. / Рукопись предоставлена Новосибирским филиалом научно-исследовательского института технологии и организации производства (НИАТ). Деп. рук. в ЦНТИ «Волна» 28 апреля 1983, Д № 05629.

21. А.с. 1114482 СССР МКИ. В 21Д 5/06 Способ изготовления гнутых профилей и устройство для его осуществления. / И.М. Колганов, С.И. Беляуш. – Опубл. Б.И., 1984, № 35.

22. А.с. № 207622. СССР МКИ. В 21Д 5/06 Способ формообразования листовых профилей и устройство, реализующее его. / И.М. Колганов, Б.В. Богданов, Г.В. Проскуряков и др.

23. Колганов И.М. Исследование процесса волочения тонкостенных профилей из листа в условиях стесненного изгиба. // Кузнечно-штамповочное производство, 1985, № 6. – С. 29-31.

24. А.с. № 1172628. СССР. МКИ. В21 Д 5/06. Способ изготовления профильных деталей. / И.М. Колганов, Г.В. Проскуряков, В.И. Колганов. – Оpubл. Б.И., 1985, № 30.

25. А.с. № 1207557. Устройство для изготовления гнутых листовых профилей. / И.М. Колганов, С.И. Беляуш, В.И. Колганов. – Оpubл. Б.И., 1986, № 4.

26. А.с. № 1215792, МКИ. В21 Д5/06. Изготовление тонкостенных профилей и устройство для его осуществления. / И.М. Колганов, Г.В. Проскуряков, В.И. Колганов. – Оpubл. Б.И., 1986, № 9.

27. А.с. № 1248690 МКИ. В 21 Д5/06. Способ изготовления листовых деталей с отбортовками. / И.М. Колганов, Г.В. Проскуряков, В.И. Филимонов и др. – Оpubл. Б.И., 1986, № 29.

28. Колганов И.М. О достижениях и перспективах развития стесненного изгиба // Сб. Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли. – М.: НИАТ, 1992. – С. 5-10.

29. Колганов И.М., Богданов Б.В. О возможности использования в конструкциях изделий алюминиево-литиевых сплавов // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология, выпуск 1 (22), 1992. – С. 9-12.

30. Изготовление профилей повышенной жесткости из листов сплава 1451 / И.М. Колганов, Н.И. Колобнев, С.В. Самохвалов и др. // Авиационная промышленность, 1992, 8. – С. 3-5.

31. Технологические возможности применения алюминиево-литиевого сплава 1430 для изготовления гнутых профилей / И.М. Колганов, Н.И. Колобнев, В.А. Марковцев и др. // Авиационная промышленность, 1992, № 10. –С. 3-5.

32. Интенсификация процессов формообразования гнутых профилей из труднодеформируемых алюминиевых сплавов / И.М. Колганов, В.А. Марковцев, А.С. Москвин. // Тезисы докладов НТК. – Пенза: ПДНТЗ, 1992. – С 51-53.

33. А.с. № 1723737. МКИ. В 64 С 3/26. Тонкостенная панель летательного аппарата. / И.М. Колганов, Г.В. Проскуряков, А.Н. Антонов. – Оpubл. Б.И., 1992, № 9.

34. Патент № 2019335.МКИ В 21 Д 5/08. Способ изготовления гнутых профилей из труднодеформируемых алюминиевых сплавов / И.М. Колганов, Б.В. Богданов, А.С. Башилов и др. – Оpubл. Б.И., 1994, № 17.

35. ТР 1.4.2023-90. Изготовление профилей и деталей из листовых заготовок сплава марки 1451 методом стесненного изгиба / И.М. Колганов, Б.В. Богданов, В.И. Филимонов, А.С. Москвин. – М.: НИАТ, 1990. – 31 с.

36. Колганов И.М. Изготовление и испытание экспериментальных панелей из алюминиево-литиевых сплавов / И.М. Колганов, А.С. Башилов, Б.В. Богданов, М.П. Федорченко // Авиационная промышленность, 1994, № 8. – С. 6-8.

37. Патент № 2226441. РФ. МКИ В21 Д5/06. Способ изготовления тонкостенных профилей из труднодеформируемых листовых материалов и волочиль-

но-прокатная установка для его реализации / И.М. Колганов, А.В. Тюнькин, О.В. Перфильев и др. – Оpubл. Б.И., 2004, № 20.

38. Патент № 2252095. РФ. МКИ В21 D5/06. Клеть профилегибочного стана /И.М. Колганов, А.В. Тюнькин, Д.В. Яковлев. – Оpubл. Б.И., 2005, № 14.

39. Патент № 2286860. РФ. МКИ. В21 D5/06. Устройство для изготовления тонкостенных профилей профилированием плоских заготовок. / И.М. Колганов, С.А. Солдатов, А.А. Будников. – Оpubл. Б.И. 2006, № 31.

40. Патент № 2269392. РФ. МКИ В21 D5/06. Способ изготовления тонкостенных профилей из труднодеформируемых листовых заготовок и автоматизированная линия для его реализации. / И.М. Колганов, О.В. Перфильев, М.С. Максимов и др. – Оpubл. Б.И., 2006, № 4.