

**КАРПУХИН ЕВГЕНИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
 ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ  
 АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРЕССАХ С ЧПУ**

2.5.7. – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Самолетостроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

**Научный руководитель:**

**Марковцев Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, акционерное общество «Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства», генеральный директор; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», кафедра «Самолетостроение», профессор.

**Официальные оппоненты:**

**Галкин Владимир Викторович** – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Машиностроительные технологические комплексы», доцент;

**Поворов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра МТ10 «Оборудование и технологии прокатки», доцент.

**Ведущая организация:**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.

Защита состоится 19 июня 2024 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» [https://ssau.ru/files/resources/dis\\_protection/Karpuhin\\_E\\_G\\_Razrabotka\\_adaptivnoj\\_tekhnologii.pdf](https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Karpuhin_E_G_Razrabotka_adaptivnoj_tekhnologii.pdf).

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_2024г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент

Я. А. Ерисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Повышение качества деталей является одной из приоритетных и важнейших задач авиастроения. В частности, такие детали как «сегменты шпангоутов» в реалиях серийного производства современного пассажирского самолета производятся путем обработки резаньем на высокопроизводительных станках из горячекатаной или термически упрочненной плиты. Известно, что при механическом способе обработки обеспечивается высокая точность геометрических размеров изделий. Однако данный способ изготовления имеет ряд существенных недостатков: низкий коэффициент использования материала (КИМ), высокая трудоемкость изготовления, а также снижение механических характеристик готового изделия за счет нарушения деформированной структуры материала заготовки. Наиболее технологичным способом изготовления сегментов шпангоутов, в данный момент, является профилирование гибкой-прокаткой методом стесненного изгиба в роликовых клетях стана заготовок из рулонного листового металла, с последующим формированием продольной кривизны гибкой шпангоута на том же оборудовании уже из гнутого профиля. Такой способ позволяет постепенно формировать в роликовых клетях стана, как поперечный, так и продольный профиль шпангоута. Шпангоуты, получаемые таким способом, имеют высокий КИМ порядка 85-95 % и высокую коррозионную стойкость. Детали, изготовленные с использованием данной технологии, уже успешно внедрены в конструкции недавно разработанных современных самолетов МС-21, Ил-112В, Ил-114, ТВРС-44, Бе-200.

Однако, для внедрения сегментов шпангоутов, изготовленных по технологии профилирования взамен фрезерованных из цельной плиты для несколько ранее разработанного пассажирского самолета, необходимо выполнить изменение его конструкции с дорогостоящим анализом прочности и надежности. Поэтому для повышения КИМ относительно серийной технологии производства пассажирского самолета без изменения существующей конструкции сегментов шпангоутов целесообразно использовать гибку с растяжением пресованного профиля на традиционных профилегибочных растяжных гидравлических прессах типа ПГР, с последующим фрезерованием по контуру на высокоточных многокоординатных фрезерных станках (таблица 1).

Известно, что процессы гибки с растяжением происходят в условиях полной или частичной неопределенности. В частности, при формообразовании сложных профильных деталей на гибочно-растяжных прессах ПГР с ручным управлением, важную роль играет мастерство, личный опыт и интуиция оператора. Вместе с тем, изготовление деталей на современном оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) позволяет неограниченное число раз воспроизводить отлаженную управляющую программу формообразования по перемещениям, инвариативную к доминирующим возмущающим факторам. Однако, применительно к процессам формообразования гибкой с растяжением пресованного профиля, такие факторы как разброс механических свойств материала и условий трения по формообразующей оправке вносят коррективы в процесс формообразования по одной и той же управляющей программе. Для увеличения стабильности формообразования

и улучшения качества деталей шпангоутов необходима постоянная коррекция управляющей программы с учетом реальных свойств материала заготовки и условий трения.

Современные гибочно-растяжные гидравлические прессы оснащены системами ЧПУ и датчиками обратной связи, что позволяет получать оперативные данные о состоянии процесса формообразования. Решение об оперативной корректировке процесса полностью возложено на оператора, что значительно повышает риск возникновения брака. Поэтому, необходимо разработать адаптивную технологию гибки с растяжением, со своевременной оперативной корректировкой управляющей программы в зависимости от действительных условий формообразования, что обеспечит стабильность формы и размеров изготавливаемых деталей.

Таблица – 1. Сравнение основных способов изготовления шпангоутов

Наименование сравнительного параметра	Технологический маршрут		
	Фрезерованный шпангоут из плиты	Фрезерованный шпангоут из гнутого прессованного профиля	Гнутый шпангоут
Масса 1 детали	<b>5,6 кг</b>	<b>5,6 кг</b>	<b>5,35 кг</b>
Расход материала на 1 деталь	<b>1418 кг</b>	<b>27 кг</b>	<b>5,8 кг</b>
Стоимость изготовления 1 изделия	<b>10 000 руб.</b>	<b>2000 руб.</b>	<b>100 руб.</b>
КИМ	<b>&lt; 1%</b>	<b>20 %</b>	<b>92%</b>
Покрытие	<b>отсутствует</b>	<b>отсутствует</b>	<b>плакированный слой</b>
Необходимость перепроектирования конструкции	<b>отсутствует</b>	<b>отсутствует</b>	<b>присутствует</b>
Ориентация зерен структуры в изделии			

**Степень разработанности темы.** Основные труды, посвященные теории и практике формообразования профильных деталей гибкой с растяжением, принадлежат Лысову М.И., Борисову В.Г., Бодунову Н.М., Одингу С.С., Кретову И.А., Р.Л. Либерману, Гусеву В.С., Черных И.А., Скоморохову В.Д., Ермолаеву В.И., Бржозовскому Б.М. и др. Для определения напряжений в сечении заготовки решается задача изгиба с растяжением. Решение такой задачи, как правило, строится путём обобщения решения задачи о чистом изгибе полосы. Величину пружинения определяют в предположении о полной разгрузке заготовки после пластического деформирования от внутренних сил. В трудах посвященных практике формообразования профильных деталей гибкой с растяжением имеется два направления усовершенствования процесса, по которым проведены исследования: интенсификация процесса формообразования гибкой с растяжением и адаптация разработанной схемы нагружения под действительные условия деформирования.

Интенсификация процесса формообразования проводится путем изменения величины растягивающего усилия в ходе формообразования, изменения схем приложения нагрузки, применения нагрева, вибраций и дополнительных средств прижима заготовки. Такие способы интенсификации могут быть использованы как дополнительные приемы при гибке с растяжением, в особых, частных случаях, когда

варьирования параметрами нагружения основных схем деформирования недостаточно.

Адаптация разработанной схемы нагружения под действительные условия деформирования может быть использована с целью компенсации отклонений в механических свойствах материалов заготовки, технологической оснастки и изменений условий трения. В частности, в работах Кретьова И.А. и С.С. Одингга предлагается с целью компенсации отклонений механических свойств заготовки адаптировать управляющую программу, измеряя на этапе предварительного растяжения действительные механические свойства заготовки. В работе Ермолаева В.И и Б.М. Бржозовского предлагается адаптировать управляющую программу для партии деталей путем включения в управляющую программу дополнительного догиба в зависимости от пружинения первой изготовленной детали из партии. Также известен гибочно-растяжной пресс, разработанный Р.Л. Либерманом, на котором совместно с заготовкой деформируется специальный гибкий кабель, при любых изменениях длины которого производится адаптивное управление растяжными гидроцилиндрами. Однако, в работах указанных авторов не рассматривалась адаптация управляющей программы на гибочно-растяжном оборудовании, исходя из условий трения, оказывающих влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе гибки с растяжением, и, как следствие, точность форм и размеров готовых деталей.

**Объектом исследования** в данной работе является процесс формообразования гибкой с растяжением прессованного профиля из высокопрочного алюминиевого сплава.

**Предметом исследования** в данной работе являются технологические режимы формообразования прессованных профилей при гибке с растяжением, а также условия, при которых протекает процесс формообразования.

**Целью диссертационной работы** является повышение точности формы и размеров сегментов авиационных шпангоутов, полученных путем формообразования гибкой с растяжением на прессах с ЧПУ, за счет применения адаптации управляющей программы нагружения под изменяющиеся условия деформирования, с использованием результатов предварительного конечно-элементного моделирования деформационного процесса заготовки.

#### **Задачи:**

1) Разработать алгоритм для моделирования процесса гибки с растяжением прессованного профиля под реальные условия формообразования.

2) Определить напряжения и деформации, которые претерпевает прессованный профиль при гибке с растяжением, используя конечно-элементное моделирование процесса формообразования.

3) Разработать методику адаптивного управления процессом формообразования гибкой с растяжением.

4) Разработать адаптивную технологию гибки с растяжением прессованного профиля.

5) Провести апробацию разработанной адаптивной технологии на действующем производстве деталей самолетов.

### **Научная новизна.**

- разработан алгоритм для моделирования гибки с растяжением пресованного профиля, позволяющий реализовать адаптивное управление процессом по расчетной программе нагружения заготовки на гибочно-растяжных прессах с ЧПУ;

- исследовано напряженно-деформированное состояние пресованного профиля в процессе гибки с растяжением, при изменяющихся условиях формообразования;

- установлена степень влияния значения коэффициента трения между заготовкой и формообразующей оправкой на деформированное состояние заготовки;

- разработана новая методика адаптации программного управления гибочно-растяжным оборудованием, учитывающая реальные деформации заготовки и позволяющая корректировать работу гибочно-растяжного прессы на основе результатов моделирования формообразования в программе LS-DYNA и, как следствие, повышающая точность геометрических размеров изготавливаемых деталей.

Полученные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.5.7. – «Технологии и машины обработки давлением», а именно: п.1 - Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки; п.4 - Технологииковки, пресования, листовой и объемной штамповки, а также формования и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок.

**Теоретическая значимость.** Представленные в работе результаты моделирования в программе LS-DYNA позволили определить требуемые деформации заготовки для обеспечения воспроизводимого результата при изменяющихся условиях контакта. Определена полная картина напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе гибки с растяжением и её пружинение в зависимости от условий трения.

Сформулированы условия, при которых протекает процесс гибки с растяжением пресованного профиля, выявлено влияние условий трения на воспроизводимость результатов процесса формообразования заготовки.

**Практическая значимость.** Использование разработанной методики адаптации управления процессом формообразования гибкой с растяжением профильных заготовок позволяет значительно сократить разброс размеров получаемых деталей (шпангоутов), а также повысить их качество, сократить количество брака, увеличить ресурс и снизить себестоимость.

**Степень достоверности** полученных результатов обосновывается успешной апробацией в условиях авиационного производства.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты конечно-элементного моделирования процесса гибки с растяжением пресованного профиля в программе LS-DYNA, положенные в основу разработанной методики адаптивного управления формообразующим процессом.

2. Методика адаптивного управления формообразующим процессом гибки с растяжением пресованного профиля, позволяющая изменять управляющую программу деформирования в режиме реального времени в зависимости от условий, при которых протекает процесс формообразования.

3. Адаптивная технология гибки с растяжением, с возможностью реализации на гибочно-растяжных прессах, оборудованных системой числового программного управления.

4. Результаты апробации адаптивной технологии гибки с растяжением, показывающие снижение статистического разброса пружинений полученных сегментов шпангоутов.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертации докладывались на конференциях: V Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения» (г. Ульяновск, 2018 г.), VI Всероссийская конференция «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения» (г. Ульяновск, 2020 г.), 5-я международная научно-производственная конференция «Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и моделирование технологических процессов в авиационной и других отраслях промышленности» (г. Ульяновск, 2020 г.), IX Всероссийская научно-производственная конференция «Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и моделирование технологических процессов в авиационной и других отраслях промышленности» (г. Ульяновск, 2024 г.). Разработанная адаптивная технология гибки с растяжением апробирована при изготовлении сегментов шпангоута из В95оч.

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 8 работ, из них 4 статьи опубликованы в изданиях из перечня ВАК, 1 статья – опубликована в издании, индексируемом международной базой Web of Science, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ.

**Внедрение результатов.** Результаты диссертационной работы внедрены на АО «Ульяновский НИАТ».

**Сведения о личном вкладе автора.** Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все основные теоретические и практические исследования проведены автором диссертационной работы самостоятельно. Подготовка к публикации некоторых результатов проводилась совместно с соавторами, вклад соискателя был определяющим.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Работа изложена на 131 странице, включает 48 рисунков, 8 таблиц. Список литературы включает в себя 111 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, определены её научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён обзор способов получения профильных деталей шпангоутов методом гибки с растяжением, принципов работы оборудования для осуществления гибки с растяжением, методов математического моделирования процесса формообразования, разработанных ранее способов интенсификации и адаптивного управления процессом гибки с растяжением.

Анализ литературы показал, что в авиационной промышленности процесс формообразования профильных заготовок гибкой с растяжением является основным для получения деталей с заданной кривизной из прессованных профилей. Однако,

разброс механических свойств материала, условия трения, а также настроечные параметры оборудования вносят элемент случайности в процесс деформирования. В случае разброса механических свойств материала, проблема частично решается наработками предыдущих исследований. Адаптация управляющей программы на гибочно-растяжном оборудовании, исходя из условий трения, не рассматривалась авторами предыдущих исследований. Учитывая при адаптации условия трения, возможно значительно повысить повторяемость результатов процесса, снизить количество брака, отказаться от постоянных изменений в параметры нагружения, вносимых вручную после очередной бракованной партии деталей, а также увеличить интервалы обновления жидких смазочных материалов и антифрикционных покрытий на формообразующей оправке.

**Во второй главе** разработан алгоритм для моделирования процесса гибки с растяжением пресованного профиля под реальные условия формообразования (рисунок 1) и получены результаты конечно-элементного моделирования в программе LS-DYNA, положенные в основу разработанной методики адаптивного управления процессом формообразования гибкой с растяжением.

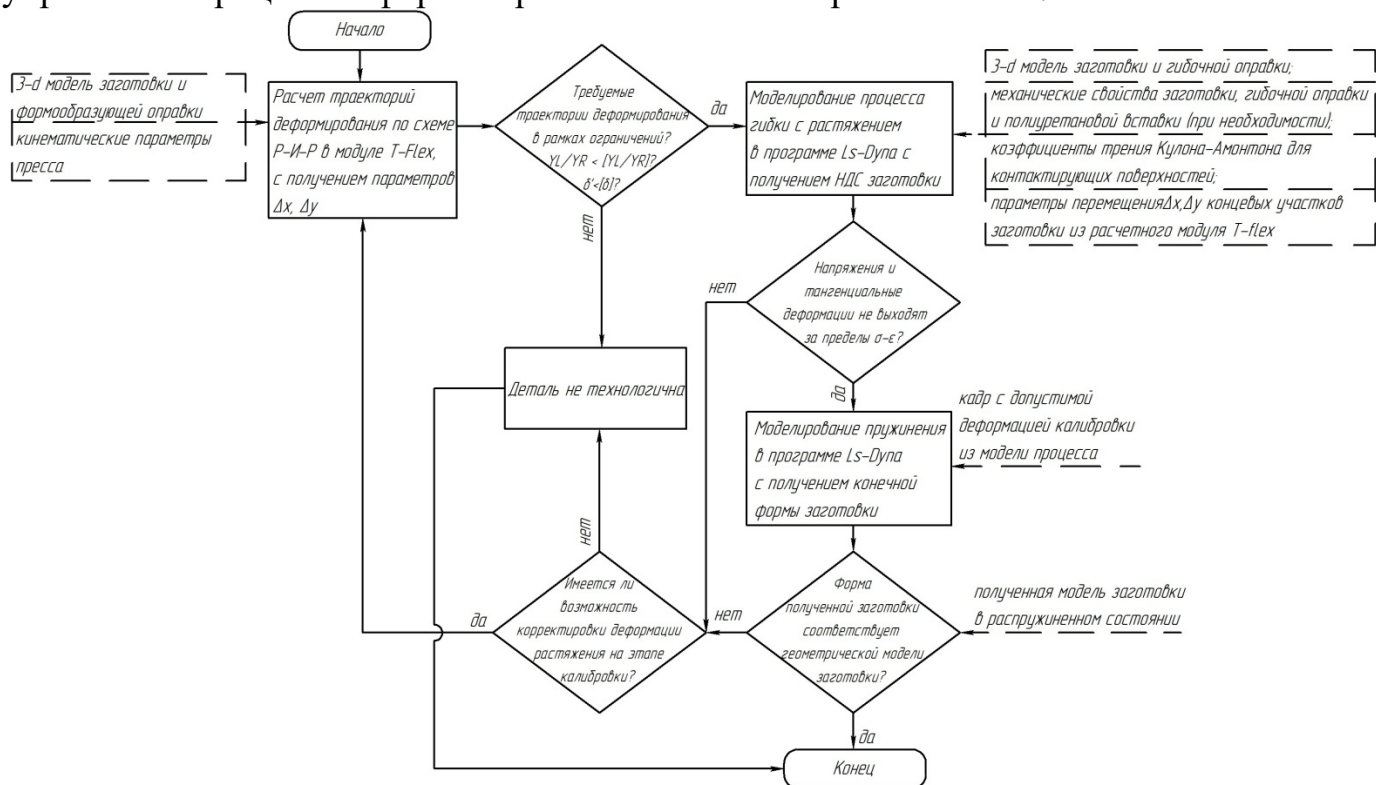


Рисунок 1 – Алгоритм для моделирования процесса гибки с растяжением

Исследована схема деформирования, при которой производится растяжение с последующим изгибом и дальнейшим дополнительным растяжением (Р-И-Р) реального промышленного пресованного профиля, имеющего Z-тавровое поперечное сечение. Материал профиля – высокопрочный алюминиевый сплав В95очМ. Первоначально выполняется растяжение профиля в прямолинейном состоянии, не касаясь формообразующей оправки, на величину 1%. На данном этапе гидроцилиндры растяжения втягиваются, растягивая заготовку. Затем, поворачивая гибочные рычаги пресса, выполняется изгиб заготовки, в ходе которого возрастают деформации растяжения, так как, при повороте гибочных рычагов пресса, растяжные



гидроцилиндры пресса втягиваются. Затем выполняется калибровка растяжением на 1 % при помощи втягивания растяжных гидроцилиндров. Визуализация процесса гибки с растяжением представлена на рисунке 2.

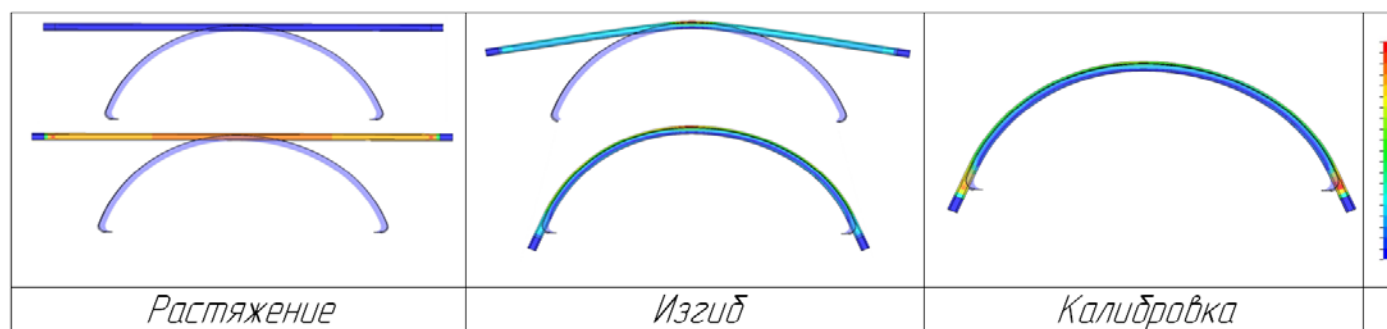


Рисунок 2 – Стадии деформирования в конечно-элементной модели гибки с растяжением профильной заготовки. Цветная шкала показывает визуальные соотношения деформаций растяжения

Для анализа напряжений и деформаций, действующих в процессе гибки с растяжением на детали, были выбраны контрольные элементы на наружном (растянутом) и внутреннем (сжатом) слое детали. Величины деформаций при коэффициентах трения  $\mu = 0,1$  и  $\mu = 0,2$  на различных этапах деформирования, на рассматриваемых элементах 327070 и 326300, практически равны. На краю заготовки, который не контактирует с формообразующей оправкой (контрольные элементы 327014 и 326244), при изменении коэффициента трения, деформации значительно отличаются. Так, для коэффициента трения 0,1, деформация удлинения в растянутой зоне заготовки составляет 7,5%, в то время как для коэффициента трения 0,2, деформация удлинения – 6,6% (рисунок 3).

Влияние трения на процесс гибки с растяжением, становится более очевидным, при сравнении распределения деформаций растяжения по растянутой центральной зоне заготовки. На рисунке 4 по результатам изгиба величины максимальных тангенциальных деформаций практически не отличаются, однако распределение деформаций отличается. Так, при коэффициенте трения 0,1 площадь наиболее растянутой зоны заготовки с деформацией 4,77% составляет 95,02 см<sup>2</sup>, в то время как при коэффициенте трения 0,2 составляет 50,98 см<sup>2</sup>. Распределение деформаций остальных прилегающих зон также отличается. Зона с деформацией 4,29%, при коэффициенте трения 0,1 имеет площадь 60,56 см<sup>2</sup>, в то время как при коэффициенте трения 0,2 данная зона имеет площадь 97,34 см<sup>2</sup>. Данное явление обусловлено более ранней остановкой процесса растяжения центральной, наиболее растянутой зоны при изгибе заготовки, вследствие действия сил трения. Соответственно площади остальных прилегающих зон также отличаются.

В зависимости от условий трения, изменялись величины тангенциальных деформаций на этапе калибровки. Максимальная величина тангенциальной деформации при коэффициенте трения 0,1 составляет 7,9 %, в то время как при коэффициенте трения 0,2 деформация растяжения составляет 9%. Необходимо отметить, что согласно кривой упрочнения для материала В95очМ, полученной при испытаниях на одноосное растяжение, предельная деформация (до начала шейкообразования) имеет величину 10%.

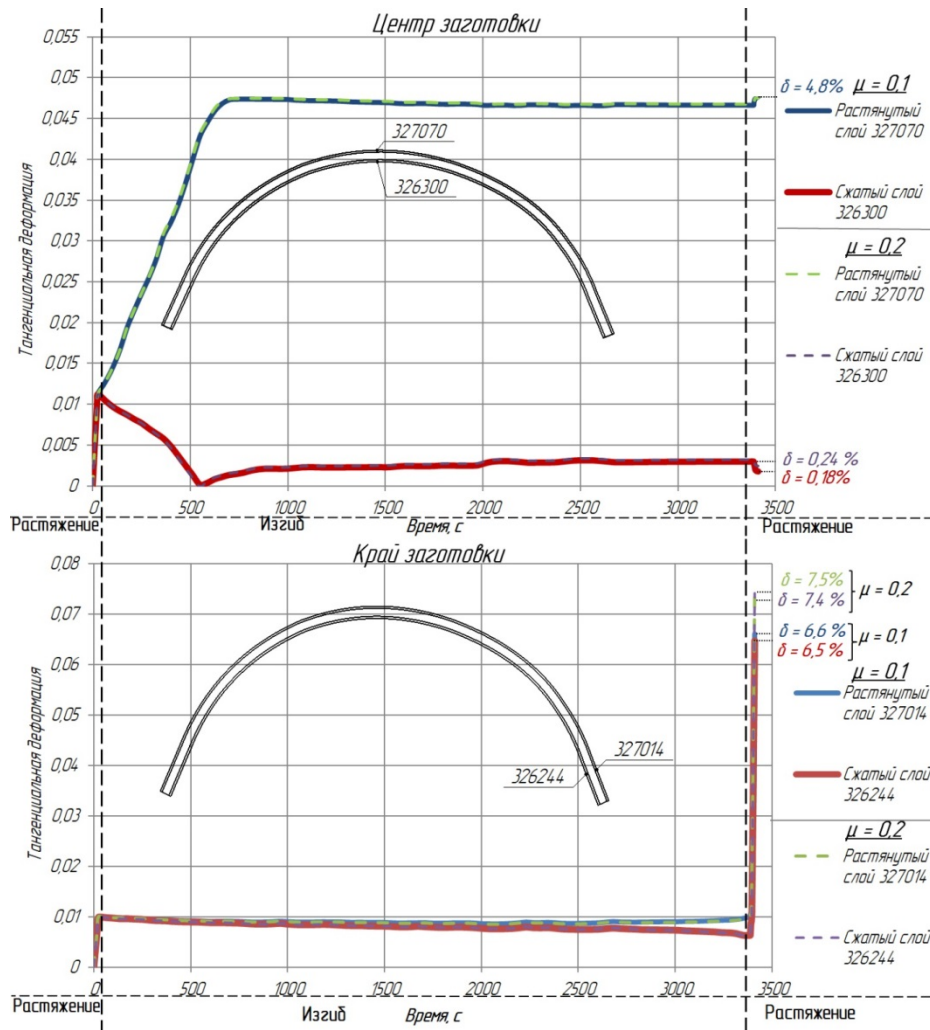


Рисунок 3 – Тангенциальные деформации контрольных элементов в центре заготовки (327070 – растянутый слой; 326300 – сжатый слой), край заготовки у зажима гибочно-растяжного прессы (327014 – растянутый слой; 326244 – сжатый слой)

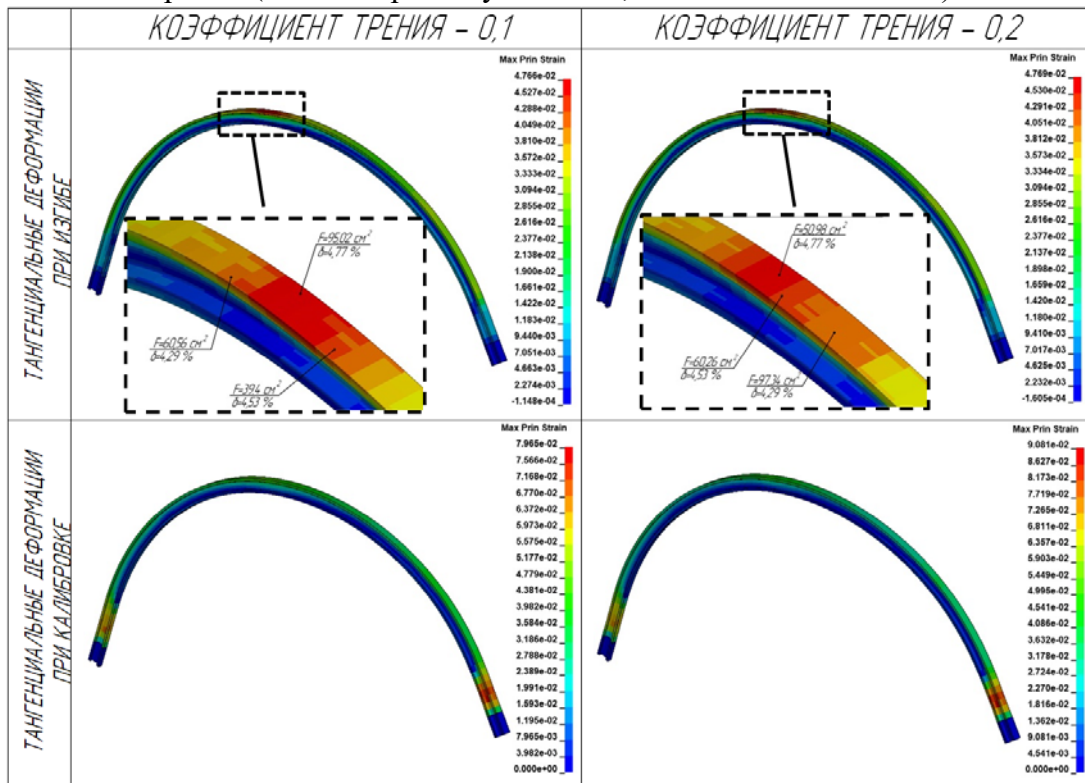


Рисунок 4 – Деформированное состояние заготовки по результатам изгиба и калибровки

Проведена оценка величин пружинения краев прессованного профиля после этапа калибровочного растяжения для заготовки, деформированной при коэффициентах трения 0,1 и 0,2. В процессе расчета в конечно-элементной модели происходила упругая разгрузка заготовки, а именно действующие напряжения преобразовывались в остаточные напряжения, и заготовка распружинивала на определенную величину. На рисунке 5 показаны величины отклонений контура полученной по результатам деформирования заготовки от контура геометрической модели из комплекта проектной конструкторской документации сегмента шпангоута. На заготовке, деформированной при коэффициенте трения 0,1, имеется перегиб, выраженный в зазорах между краями геометрической модели заготовки и краями полученной деформированной заготовки, имеющих 9,8 мм и 10,45 мм соответственно. Такой перегиб возможно устранить, снизив величину перемещений штока растяжного гидроцилиндра на этапе калибровки. В то время как заготовка, деформированная при коэффициенте трения 0,2, имеет недогиб, выраженный в зазорах между краями геометрической модели заготовки и краями полученной деформированной заготовки, имеющих величины 13,17 мм и 14,09 мм. Такой недогиб невозможно устранить путем дополнительной калибровки, так как максимальная деформация заготовки на этапе калибровки в зоне, находящейся у зажимов составляет 9 %.

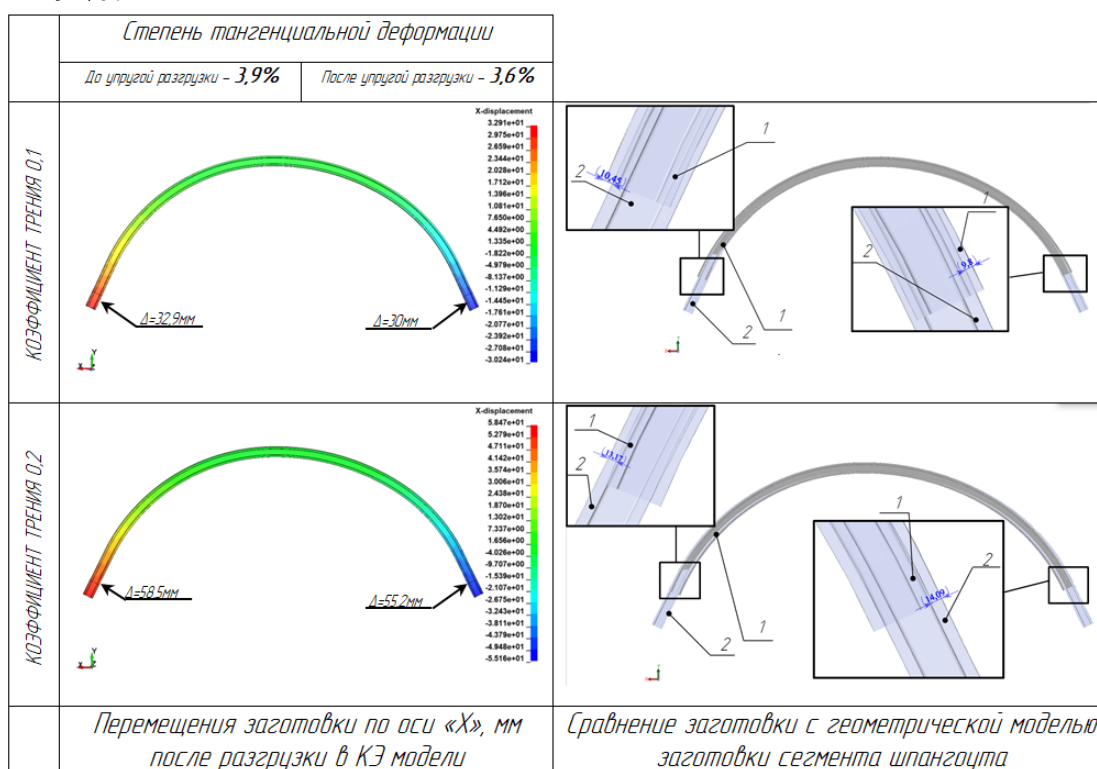


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель пружинения заготовки:

$\Delta$  – величина перемещения заготовки в ходе разгрузки по оси «X»

Для коэффициента трения 0,1 проведено определение требуемой величины смещения штоков растяжных гидроцилиндров, устраняющей недопустимый разброс пружинения и определен диапазон разброса коэффициентов трения, в котором возможно получить бездефектные заготовки сегментов шпангоутов (рисунок 6), составляющий 0,1...0,14. В случае, если коэффициент трения превысит значение 0,14, для дальнейшей калибровки необходимо растягивать материал прессованного

профиля до образования локального утонения профиля (шейкообразования), что повлечет за собой недопустимое уменьшение размеров поперечного сечения деформируемой заготовки.

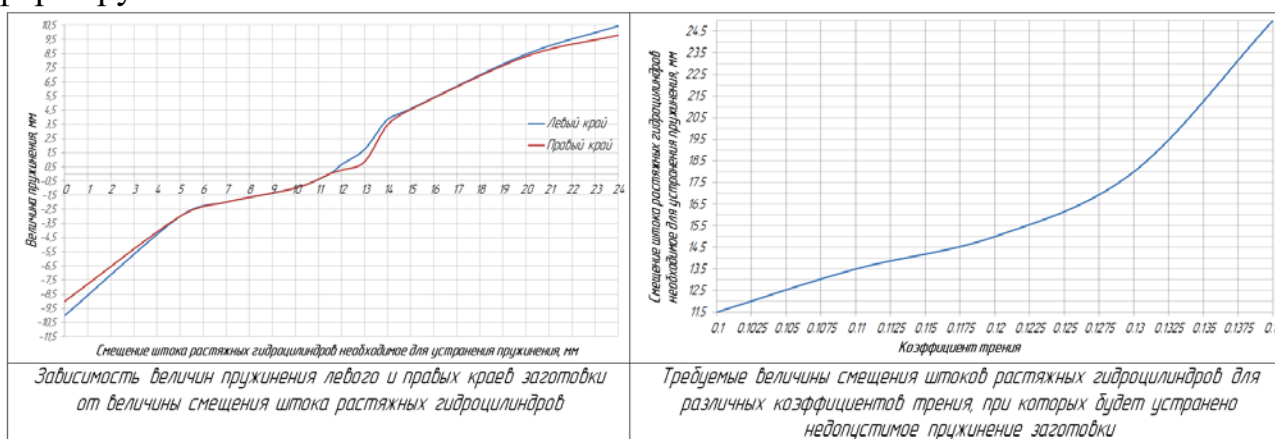


Рисунок 6 – Графики, полученные по результатам определения требуемой величины смещения штоков растяжных гидроцилиндров для устранения недопустимого разброса пружинения

Проведен натурный эксперимент по валидации работы разработанных конечно-элементных моделей, в ходе которого заготовка длиной 4700 мм деформировалась на прессе V-80 по схеме Р-И-Р на гибочном пуансоне, спроектированном с учетом пружинения. Максимальная разница между абсолютными тангенциальными деформациями в модели и натурном эксперименте по растянутому слою составляет 0,2 мм (рисунок 7).

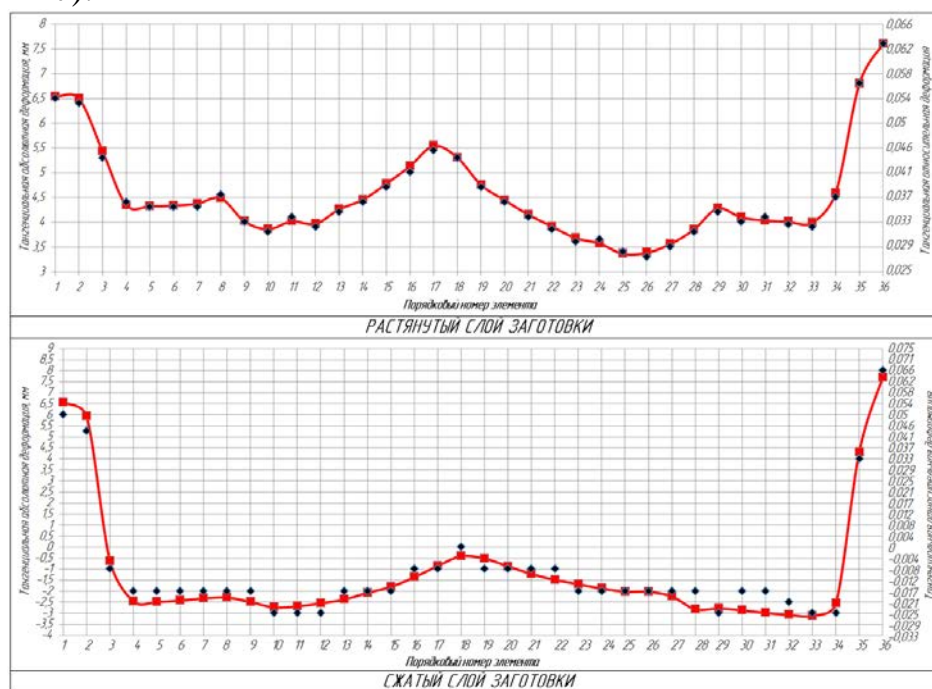


Рисунок 7 – Кривые распределения деформаций по контрольным элементам:

- – данные полученные из конечно-элементной модели процесса;
- ◆ – данные полученные из натурального эксперимента

В третьей главе разработана методика адаптивного управления процессом формообразования гибкой с растяжением и средства её осуществления. Основу адаптации составляет группа управляющих программ, подготовленных на основе результатов конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния заготовки при разных величинах коэффициентов трения. Данная группа



управляющих программ должна находиться в памяти ЧПУ гибочно-растяжного прессы. Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки выполняется методом конечных элементов, базируясь на разработанном алгоритме для моделирования гибки с растяжением прессованного профиля. Соответственно имеются две части управляющей программы. Первая часть неизменяемая и содержит в себе начальный этап растяжения заготовки в прямолинейном состоянии и последующий её изгиб на полный угол охвата формообразующей оправки с незначительным калибровочным растяжением, обеспечиваемым перемещением штоков гидроцилиндров растяжения на величину, составляющую 0,25% от длины исходной заготовки. Такое растяжение после гибки показывает значительную разницу между деформациями, при различных коэффициентах трения. Кадры дальнейшей калибровки растяжением содержатся во второй части, вариативной, управляющей программы. Обе части управляющей программы построены на основе конечно-элементного анализа процесса гибки с растяжением. Измерение деформации растяжения возможно производить при помощи экстензометра, прикрепленного на растянутый пояс профиля, позволяющего передавать данные обратной связи в режиме реального времени. Важно, чтобы экстензометр устанавливался на конце заготовки ближе к зажиму прессы, так как данная зона практически не изгибается на радиус кривизны и является прямолинейной, что минимизирует погрешности измерения тангенциальных деформаций. Действительная тангенциальная деформация на заготовке измеряется и оценивается в момент завершения предварительной калибровки. Затем производится сравнение полученной измеренной тангенциальной деформации заготовки с деформациями, имеющимися в массиве вариативных частей управляющей программы деформирования. В случае если имеется управляющая программа с аналогичными деформациями, производится адаптация процесса калибровки. Для реализации описанной методики разработана и запатентована система адаптивного управления процессом гибки с растяжением профилей (рисунок 8). Для формирования и своевременной оперативной

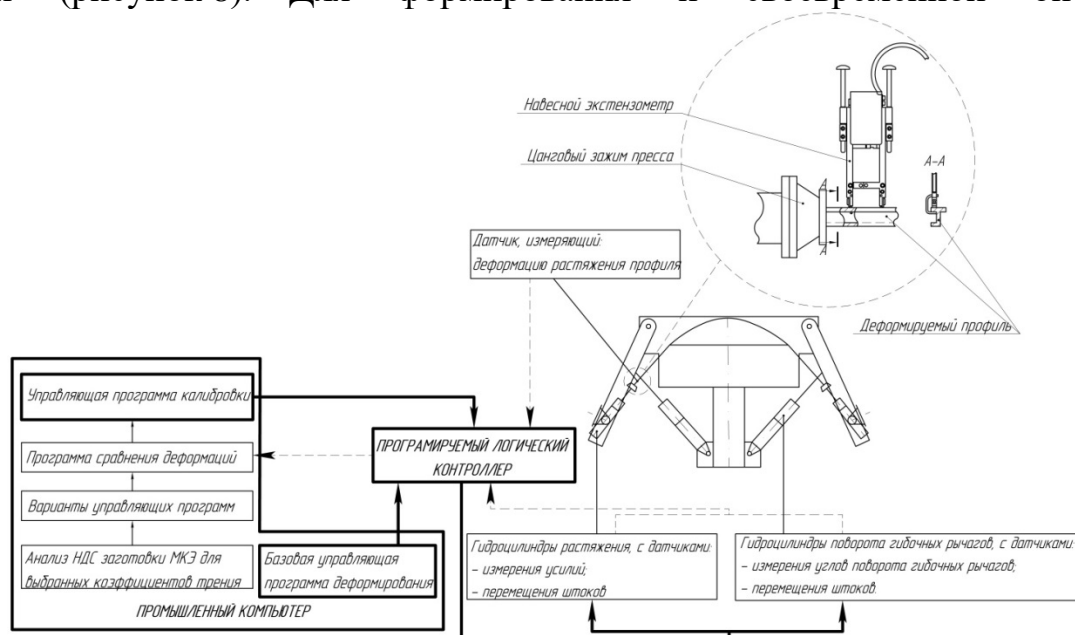


Рисунок 8 – Блок-схема системы адаптивного управления процессом гибки с растяжением для гибочно-растяжного прессы:  $\longrightarrow$  – пути передачи команд на исполнительные механизмы прессы;  $\longleftarrow$  – данные обратной связи;  $\longrightarrow$  - пути преобразования данных в промышленном компьютере

корректировки вариативных частей управляющей программы, разработан модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с ЧПУ.

Таким образом, адаптивная технология гибки с растяжением профильных деталей авиационных конструкций выглядит следующим образом. Заготовку закрепляют в зажимах пресса, и затем на неё устанавливают экстензометр. После чего заготовку растягивают, изгибают и предварительно калибруют по базовой управляющей программе деформирования. При помощи модуля адаптации управляющей программы нагружения, в автоматическом режиме на промышленном компьютере ЧПУ, производится сравнение тангенциальных деформаций заготовки полученных с экстензометра и тангенциальных деформаций, имеющих в моделях. Управляющая программа калибровки, с наиболее близким значением тангенциальных деформаций к моделируемому, в автоматическом режиме передается на исполнительные механизмы гибочно-растяжного пресса, таким образом, адаптируя процесс под реальные условия трения. После извлечения заготовки из зажимов гибочно-растяжного пресса производится контроль полученной продольной кривизны детали по внешнему и внутреннему контурам путем сравнения с контрольным шаблоном и геометрии поперечных сечений путем измерения линейных и угловых размеров.

**В четвертой главе** была проведена апробация разработанной технологии формообразования прессованного полуфабриката из алюминиевого сплава В95оч на авиастроительном предприятии. Апробация заключалась в изготовлении пробной партии профильных заготовок сегментов шпангоутов двух типоразмеров из алюминиевого сплава В95очМ в отожжённом состоянии на гибочно-растяжном прессе V-80. Технология апробировалась на 16 заготовках сегментов шпангоута из прессованного профиля Z-таврового сечения (рис. 10), из которых 8 штук (№1-№8) имеют несимметричное продольное сечение длиной 4,7 м с переменным радиусом кривизны, а также 8 штук (№9-№16) имеют симметричное продольное сечение с постоянным радиусом кривизны, с длиной 4 м.



Рисунок 9 – Внешний вид деформированных заготовок на прессе V-80

Результаты апробации показали значительное уменьшение статистического разброса пружинения получаемых деталей. Так, разброс пружинений на детали «заготовке сегмента шпангоута» снижен с 11,7 мм до 0,6 мм. По результатам апробации разработанной технологии получен акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии АО «Ульяновский НИАТ», занимающимся разработкой и внедрением в производство технологии и оборудования для

изготовления профилей для авиационной промышленности. Использование разработанной технологии позволяет сократить объем ручных доводочных операций по доработке формы прессованного профиля после формообразования гибкой с растяжением и значительно снизить временные и материальные затраты на перепроектирование технологической оснастки.

**В заключении** приводятся основные результаты диссертации и выводы.

**Перспективы дальнейшей разработки темы:** С развитием вычислительных мощностей компьютеров, перспективной является разработка способа адаптации управляющей программы на протяжении всего процесса деформирования с пересчетом конечно-элементной модели в режиме реального времени. Для реализации такого способа адаптации необходимо провести исследования всех возможных случаев деформированного состояния, разработать средства измерения деформаций по всей заготовке, с возможностью получения результатов в режиме реального времени, а также разработать алгоритм принятия решений с соответствующей управляющей программой. Также перспективной является модернизация конструкции гибочно-растяжного пресса V-80 путем уменьшения расстояния между осями вращения гибочных рычагов, что позволит значительно расширить номенклатуру изготавливаемых деталей.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработан алгоритм для моделирования гибки с растяжением прессованного профиля, позволяющий реализовать адаптивное управление процессом по расчетной программе нагружения заготовки на гибочно-растяжных прессах с ЧПУ.

2. Определены напряжения и деформации заготовки (прессованного профиля) при гибке с растяжением. Результаты исследования показали, что в зависимости от коэффициента трения, деформации растяжения заготовки отличаются, что ведет к разбросу значений пружинения.

3. Выполнены численные эксперименты с коэффициентами трения, в ходе которых определена зависимость смещения штоков растяжных гидроцилиндров необходимого для устранения пружинения от коэффициента трения.

4. Разработана методика адаптивного управления процессом формообразования гибкой с растяжением, позволяющая обеспечить стабильность формы и размеров изготавливаемых деталей.

5. Разработана система адаптивного управления процессом гибки с растяжением, с учетом особенностей условий трения в процессе деформирования конкретной заготовки, на которую получен патент на изобретение № 2808294. Разработано программное обеспечение – модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением, на которое получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023666945.

6. Разработана и апробирована адаптивная технология гибки с растяжением на гибочно-растяжных прессах с числовым программным управлением. Апробация осуществлена при формообразовании детали «сегмента шпангоута» из В95очМ. Статистический разброс пружинений на деталях снижен с 11,7 мм до 0,6 мм. Результаты диссертационной работы внедрены в акционерном обществе «Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства».

7. Определены перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы, а именно создание способа адаптивного управления, с реализацией в виде системы управления, которая будет в режиме реального времени корректировать весь процесс деформирования и модернизация конструкции гибочно-растяжного прессы V-80.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

#### **Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Карпухин, Е. Г.** Особенности процесса формообразования заготовок сегментов шпангоутов на основе технологии гибки с растяжением пресованного профиля из высокопрочных алюминиевых сплавов / Е. Г. Карпухин, В. А. Марковцев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 257-264.

2. **Карпухин, Е. Г.** Моделирование процесса гибки с растяжением заготовки сегмента шпангоута на гибочно-растяжном прессе с ЧПУ / Е. Г. Карпухин, М. В. Илюшкин, В. А. Марковцев // Технология машиностроения. – 2023. – № 7. – С. 13-25.

3. **Карпухин, Е. Г.** Применение антифрикционных покрытий для снижения контактного трения при формообразовании оболочек двойной кривизны обтяжкой на обтяжных пуансонах из алюминиевых сплавов / Е. Г. Карпухин, Г. Л. Ривин, А. О. Кошкина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 1(99). – С. 41-47.

4. Методика расчета режима исследования антифрикционных свойств покрытий обтяжных пуансонов / Г. Л. Ривин, **Е. Г. Карпухин**, А. О. Кошкина, Г. В. Дмитриенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 4-3(84). – С. 414-416.

#### **Статьи в зарубежных рецензируемых журналах:**

5. Improvement of the processes of forming tight shells of double curvature / V. A. Markovtsev, **E. G. Karpukhin**, V. A. Mikheev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : III International Scientific Conference, Krasnoyarsk, 29–30 апреля 2021 года. Vol. Volume 1155. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12014.

#### **Объекты интеллектуальной собственности:**

6. Патент № 2808294 С1 Российская Федерация, МПК В21D 7/12. Система адаптивного управления процессом гибки с растяжением профилей для гибочно-растяжного прессы : № 2023107026 : заявл. 23.03.2023 : опубл. 28.11.2023 / **Е. Г. Карпухин**, В. А. Марковцев.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666945 Российская Федерация. Модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением : № 2023665942 : заявл. 27.07.2023 : опубл. 08.08.2023 / **Е. Г. Карпухин**.

#### **Публикации в других изданиях:**

8. **Карпухин, Е. Г.** Оценка антифрикционных свойств покрытий обтяжных пуансонов для возможности применения при формообразовании обшивок обтяжкой на обтяжных прессах FET И FEL / Е. Г. Карпухин, А. О. Кошкина // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : тексты докладов участников Международной молодёжной научной конференции, в 6 т., Казань, 07–08 ноября 2019 года. Том I. – Казань: Издательство ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 427-431.