

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Марковцев Владимир Анатольевич
доктор технических наук

Ульяновск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ «ВОПРОСА» И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1. Особенности производства сегментов шпангоута	9
1.2. Анализ оборудования, применяемого для формообразования	15
1.3. Анализ технологических схем деформирования	18
1.4. Обзор способов совершенствования процесса гибки с растяжением	21
1.5. Термическая и механическая обработка при изготовлении сегментов шпангоутов из сплава В95	27
1.6. Постановка цели и основных задач исследования	30
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ	40
2.1. Конечно-элементная модель процесса гибки с растяжением	41
2.2. Определение траекторий движения концов заготовки	48
2.3. Анализ напряженного-деформированного состояния (НДС) заготовки	54
2.4. Натурный эксперимент по валидации работы разработанных конечно-элементных моделей	65
2.5. Алгоритм моделирования процесса гибки с растяжением	67
2.6. Выводы по главе	69
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ	71
3.1. Выбор физической величины, характеризующей фактические условия трения в процессе деформирования и способа её измерения	71
3.2. Методика адаптации управляющей программы нагружения заготовки в ходе гибки с растяжением	77
3.3. Система адаптивного управления процессом гибки с растяжением	80
3.4. Разработка адаптивной технологии гибки с растяжением	83
3.5. Выводы по главе	89

ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ АДАПТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ	90
4.1. Условия апробации технологии	90
4.2. Результаты апробации технологии	91
4.3. Перспективы развития исследований адаптации управления процессом гибки с растяжением	101
4.4. Выводы по главе	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	122
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	124

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества деталей, изготавливаемых с помощью технологий холодного пластического деформирования, является одной из приоритетных и важнейших задач авиастроения.

В самолетостроении, наименее точными являются заготовительно-штамповочные операции. Процесс гибки, вытяжки, обтяжки очередной партии заготовок производится в условиях полной или частичной неопределенности. В частности, при формообразовании сложных деталей на обтяжных прессах (марок РО, ПГР, ОП) с ручным управлением важную роль играет мастерство, личный опыт и интуиция рабочего. Вместе с тем, изготовление деталей на станках с ЧПУ позволяет неограниченное число раз воспроизводить отлаженную управляющую программу формообразования по перемещениям, инвариативную к большой доле доминирующих возмущающих факторов [1]. Но для того, чтобы производить формообразование на станках с ЧПУ необходимо уметь управлять всеми параметрами процесса, практически исключив какие-либо случайности, в условиях нестабильности свойств исходных материалов и условий процесса.

Данная диссертационная работа посвящена совершенствованию заготовительно-штамповочных процессов изготовления нормальных шпангоутов самолета, путем разработки и внедрения принципа управления формообразованием в режиме реального времени по деформациям заготовки, перемещениям и усилиям в исполнительных механизмах прессов.

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

Предметом исследования в данной работе являются 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 прессованного профиля, позволяющий реализовать адаптивное управление процессом по расчетной программе нагружения заготовки на гибочно-растяжных прессах с ЧПУ;

- исследовано напряженно-деформированное состояние прессованного 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 пресса, 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, прессования, 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 гибкой с растяжением прессованного профиля, выявлено влияние условий трения на воспроизводимость результатов процесса формообразования заготовки.

Практическая значимость. Использование разработанного метода адаптации управления процессом формообразования гибкой с растяжением профильных заготовок позволяет значительно сократить разброс размеров получаемых деталей (шпангоутов) и повысить их качество, снизить количество брака.

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

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты конечно-элементного моделирования процесса гибки с растяжением прессованного 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, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, 1 статья в издании, индексируемом базой Web of Science; получены 1 патент на изобретение и 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ «ВОПРОСА» И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Особенности производства сегментов шпангоута

Шпангоуты представляют собой замкнутые балки кольцевой формы, разделенные на сегменты, чаще всего с z-образным, швеллерным или двутавровым поперечным сечением (рисунок 1.1) [2]. Сравнение основных способов изготовления шпангоутов приведено в таблице 1.1.

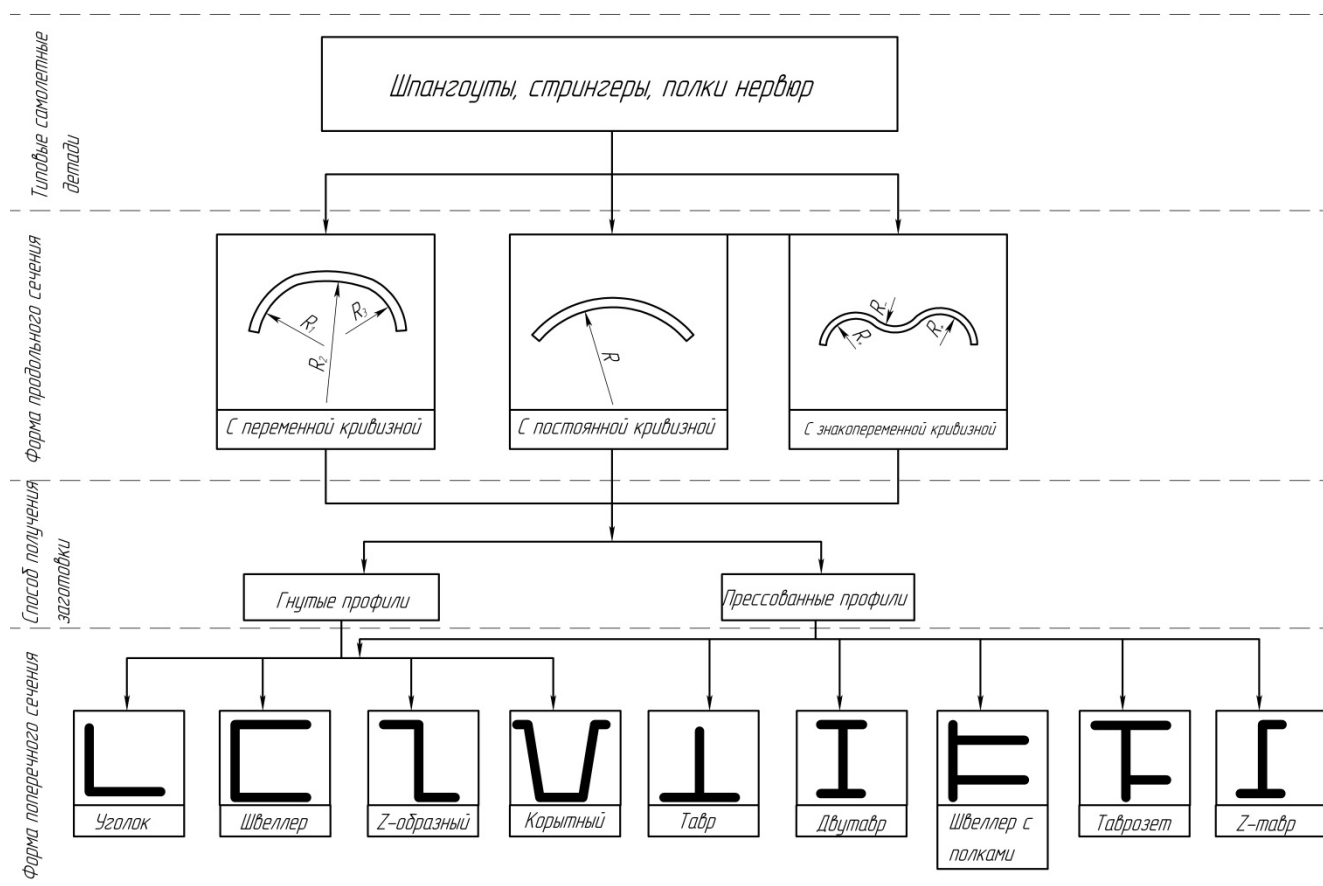


Рисунок 1.1 – Номенклатура деталей, изготавливаемых при помощи гибки с растяжением

Сегменты шпангоутов в реалиях серийного производства современного пассажирского самолета производятся путем обработки резаньем на высокопроизводительных станках из горячекатаной или термоупрочненной плиты В95очТ2 [3-6]. Известно, что при механическом способе обработки обеспечивается высокая точность геометрических размеров изделий. Однако

данный способ имеет ряд существенных недостатков: низкий коэффициент использования материала (КИМ), высокая трудоемкость изготовления; снижение механических характеристик готового изделия за счет нарушения деформированной структуры материала заготовки, отсутствие плакировки и др.

Известен способ изготовления сегментов шпангоутов путем изотермической штамповки. Недостатком данного способа является значительный температурный разогрев в процессе деформирования, способный привести к пережогу металла [7].

Зарубежные ученые для подобной конфигурации сегментов шпангоутов предлагают использовать процесс прессования с получением заданной кривизны профиля [8, 9]. Формирование кривизны происходит путем изгиба в специальном приспособлении, находящемся на выходе из контейнера для прессования. Такой способ позволяет получать профили только с постоянным радиусом кривизны, что резко ограничивает номенклатуру изготавливаемых типоразмеров сегментов шпангоутов.

Одним из возможных способов является изготовление сегментов шпангоутов из раскатных колец [3]. При таком способе не требуется изменения существующих конструкций самолетов. Однако данная технология может быть использована только для формирования заготовок сегментов шпангоутов постоянной кривизны.

Наиболее технологичным способом изготовления сегментов шпангоутов является профилирование гибкой-прокаткой методом стесненного изгиба в роликовых клетях стана заготовок из рулонного листового металла с последующим продольным формированием гибкой шпангоута на том же оборудовании уже из гнутого профиля [10-13]. Такой способ позволяет постепенно формировать в роликовых клетях стана, как поперечный, так и продольный профиль шпангоута. Шпангоуты, получаемые таким способом, имеют высокий КИМ порядка 85-90 % и высокую коррозионную стойкость за счет сохранения плакированного слоя. Детали, изготовленные с использованием данной технологии, уже успешно были внедрены в конструкции недавно

разработанных современных самолетов МС-21, Ил-112В, Ил-114, ТВРС-44, Бе-200. Для внедрения сегментов шпангоутов, изготовленных по такой технологии взамен фрезерованных из цельной плиты для несколько ранее разработанного пассажирского самолета, необходимо провести изменение его конструкции с дорогостоящим анализом прочности и надежности.

Для повышения КИМ относительно серийной технологии производства самолета без изменения существующей конструкции сегментов шпангоутов, целесообразно использовать гибку с растяжением прессованного профиля на традиционных профилегибочных растяжных гидравлических прессах типа ПГР и последующим фрезерованием по контуру на высокоточных многокоординатных фрезерных станках. Для снижения технологических усилий при гибке, профиль целесообразно использовать в отожженном состоянии. Сечение прессованного профиля должно быть близким к окончательному поперечному сечению готовой детали (рисунок 1.2).

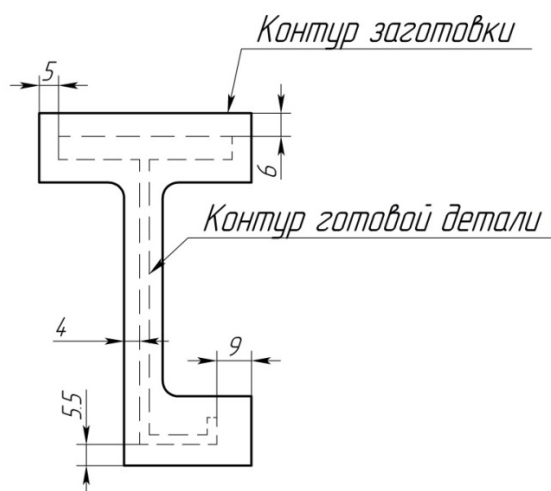


Рисунок – 1.2. Поперечное сечение заготовки и готовой детали (сегмента шпангоута)

Однако при проведении процесса фрезерования изогнутой детали происходит перераспределение остаточных напряжений, и деталь изменяет свою кривизну [6]. Для снятия остаточных напряжений и улучшения обрабатываемости

резанием, перед операцией фрезерования необходимо провести термическую обработку деформированной заготовки.

Рассматриваемый способ позволяет изготавливать сегменты шпангоутов как постоянной, так и переменной кривизны.

Технология гибки с растяжением является традиционной для самолетостроения и используется не только для придания кривизны сегментам шпангоута, но и другим элементам конструкции самолета, таким как стрингеры и полки нервюр и др [14-18]. Процесс гибки с растяжением прессованных профилей заключается в деформировании заготовки под воздействием растягивающих сил и изгибающих моментов. Основные труды, посвященные теории формообразования профильных деталей гибкой с растяжением, принадлежат научной школе Лысова М.И. [1, 19-23, 37].

Таблица – 1.1. 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	5,6 кг	5,6 кг	5,35 кг
Расход материала на 1 деталь	1418 кг	27 кг	5,8 кг
Стоимость изготовления 1 изделия	10 000 руб.	2000 руб.	100 руб.
КИМ	< 1%	20 %	92%
Покрытие	отсутствует	отсутствует	плакированный слой
Необходимость перепроектирования конструкции	отсутствует	отсутствует	присутствует
Ориентация зерен структуры в изделии			

Согласно теории формообразования профильных деталей гибкой с растяжением, 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, влияющую на форму готовых деталей, определяют в предположении о полной

разгрузке заготовки после пластического деформирования от внутренних сил. Добавление к изгибу тангенциального растяжения позволяет сместить положение нейтрального слоя к центру поперечного сечения заготовки и снизить величину внешнего изгибающего момента, под действием которого изменяются длины волокон выше и ниже нейтрального слоя сечения профиля [16]. В работах Ю.М. Арышенского и С.И. Вдовина определяются внутренние усилия в сечениях заготовки непосредственно перед разгрузкой [24, 25]. Затем, решая задачу об упругом деформировании заготовки под действием нагрузок, равных по величине, но обратных по направлению нагрузкам при формообразовании, определяют пружинение.

Исследователем И. А. Кретовым [26] были приведены следующие дефекты, возникающие при формообразовании профилей гибкой с растяжением:

- разрывы заготовки;
- недопустимая разнотолщинность профиля;
- складки заготовки;
- искажение формы детали после снятия технологических усилий за счет пружинения.

Дефекты складкообразования и недопустимая разнотолщинность профиля учитываются при формообразовании гибкой с растяжением гнутых тонкостенных профилей. Для толстостенного прессованного профиля основными дефектами являются разрывы, малковка и искажение формы детали после снятия технологических усилий за счет пружинения. Появление на деталях описанных дефектов влечет за собой дополнительные доработки средств технологического оснащения, корректировку управляющей программы и как следствие дополнительные затраты.

Все эти дефекты имеют деформационную природу и могут оцениваться по полученным деформациям [26]. Разрывы заготовки профиля являются неустранимым браком, в то время как недопустимое пружинение заготовки возможно устранить, изменяя напряженно-деформированное состояние, например используя дополнительный переход калибровки, либо ручную доводку.

Пружинение профиля частично можно учитывать на технологической оснастке. Замалкованность возможно устранить, применяя технологические вставки, устанавливаемые между двумя полками профиля, и предохраняющие их от дополнительного изгиба. Материал таких вставок должен иметь достаточную жесткость при высоких значениях удлинения, с минимальной остаточной деформацией (для возможности повторного использования). Таким характеристиками обладает известный в авиационной промышленности полиуретан марки СКУ-7Л.

Практически полностью устранить приведенные дефекты возможно, управляя процессами гибки с растяжением, с использованием результатов моделирования, полученных путем применения численных методов решения задач определения напряженно-деформированного состояния заготовки. Под численными методами решения задач подразумеваются следующие:

- метод конечных разностей;
- метод граничных элементов;
- метод конечных элементов.

Использование метода конечных элементов для определения напряженно-деформируемого состояния заготовки в схожих по деформационной природе процессах обтяжки заготовок из листового металла показало сходимость с практикой более чем 85 % [27, 28]. Стоит отметить, что в исследованиях сходимость определялась путем сравнения деформаций заготовки. В диссертационной работе, в качестве инструмента для проведения анализа напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе гибки с растяжением применялась программа LS-Dyna (лицензия 1464). Инструменты, используемые в ходе численных экспериментов подробно описаны в инструкциях к программе [29-31].

Известно, что формообразующие процессы гибки с растяжением производятся 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 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 прессованного 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 штангоутов необходима коррекция программы управления с учетом реальных свойств материала заготовки и условий трения.

Современные гибочно-растяжные гидравлические прессы оснащены системами числового программного управления (ЧПУ) и датчиками обратной связи, что позволяет получать оперативные данные о состоянии процесса формообразования. Однако решение об оперативной корректировке процесса до сих пор полностью возложено на оператора. Поэтому необходима методика адаптации, корректирующая управляющую программу в зависимости от действительных условий формообразования непосредственно в процессе деформирования. Это повышает стабильность результатов формообразования и точность размеров изготавливаемых деталей.

1.2. Анализ оборудования, применяемого для формообразования

Основным оборудованием, применяемым для гибки с растяжением профилей, являются гибочно-растяжные прессы. Принципиальная схема гибочно-растяжного прессы представлена на рисунке 1.3.

Формообразующая оправка 2 устанавливается по специальным отверстиям на штифты неподвижного стола 1. При работе прессы концы изгибаемого профиля 3 зажимаются в цанговых зажимных патронах 4, которые закреплены на штоках 5 растяжных гидроцилиндров 6. Растяжные гидроцилиндры 6 шарнирно

закреплены на каретках 7, перемещающихся по направляющим вдоль гибочных рычагов 8 [1]. Каретки 7 перемещаются с помощью ходового винта, привод которого рассчитан только для установочных перемещений кареток. Не допускается вращение винта под нагрузкой [26]. Гибочные рычаги 8 вращаются вокруг осей O_1 . Поворот гибочных рычагов осуществляется за счет движения штоков 9 гибочных гидроцилиндров 10, шарнирно соединенных с гибочными рычагами в точке O_2 и со станиной пресса в точке O_3 . Растяжные гидроцилиндры 6 используются для предварительного и окончательного растяжения заготовки. В процессе поворота гибочных рычагов 8 шток 5 растяжных гидроцилиндров также перемещается, ограничивая угол поворота гибочных рычагов и величину возможного смещения на этапе окончательного растяжения, при использовании длинных заготовок деформируемых на большие углы изгиба.

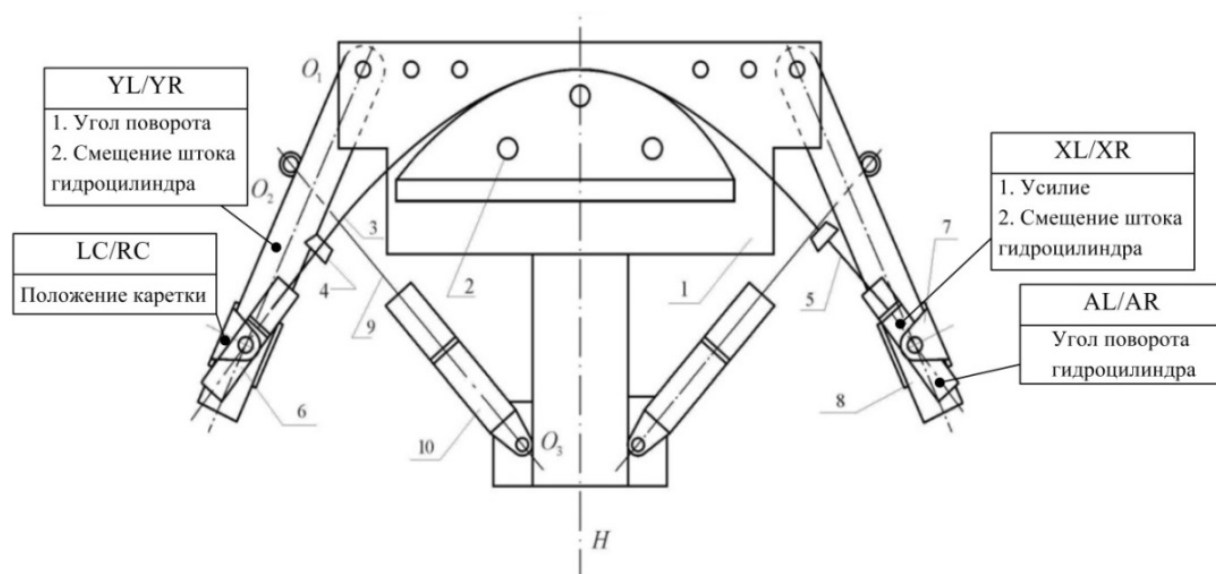


Рисунок – 1.3. Схема гибочно-растяжного пресса с ЧПУ: 1 – неподвижный стол; 2 – формообразующая оправка; 3 – заготовка; 4 – зажимные патроны; 5 – шток растяжного гидроцилиндра; 6 – растяжной гидроцилиндр; 7 – каретка; 8 – гибочный рычаг; 9 – шток гибочного гидроцилиндра; 10 – гибочный гидроцилиндр; O_1 – ось поворота гибочного рычага; O_2 – ось вращения гибочного гидроцилиндра на гибочном рычаге; O_3 – ось вращения гибочного гидроцилиндра на станине пресса; Н-Н – ось симметрии станка; YL/YR; LC/RC; XL/RL; AL/AR – программируемые параметры пресса

Современные гибочно-растяжные прессы оснащены системами числового программного управления (ЧПУ) и датчиками обратной связи, что позволяет получать оперативные данные о состоянии процесса формообразования. Решения об оперативной корректировке процесса полностью возложены на оператора, что значительно повышает риск возникновения брака. На таких прессах установлена система, передающая на стойку оператора ЧПУ в режиме реального времени значения параметров гидроцилиндров и положения каретки (таблица 1.2). Управление растяжением профиля осуществляется за счет варьирования параметрами смещения штока или величиной усилий растяжного гидроцилиндра по координатам пресса XL/XR. Управление изгибом заготовки осуществляется за счет варьирования параметрами поворота гибочных рычагов по координатам пресса YL/YR. Угол поворота растяжных гидроцилиндров, шарнирно закрепленных на гибочных рычагах, зависит от текущего положения гибочных рычагов и заготовки на формообразующей оправке.

Таблица – 1.2. Параметры получаемые в процессе работы на гибочно-растяжных прессах с ЧПУ

Наименование отслеживаемого параметра	Индикация на стойке ЧПУ*	Возможность управления параметром**
Растяжной гидроцилиндр		
Угол поворота растяжного гидроцилиндра, °	AL/AR	-
Перемещение штока растяжного гидроцилиндра, мм	XL/XR	+
Усилие на растяжном гидроцилиндре, т		+
Гибочный гидроцилиндр		
Угол поворота гибочного рычага, °	YL/YR	+
Перемещение штока гибочного гидроцилиндра, мм		+

Окончание таблицы 1.2

Положение каретки на гибочном рычаге, мм	LC/RC	+
Скорость движения рабочих органов пресса, % от максимальной скорости	Прогресс.Скорость Рабочая Скорость	+
Индикация корректности работы приводов пресса, ОК/НОК	Двигатели	-
<p>Примечание:</p> <p>*Вышеперечисленные буквы в индикации на стойке ЧПУ означают:</p> <p>«L» – левая сторона</p> <p>«R» – правая сторона</p> <p>**Возможность управления характеризуется:</p> <p>«-» – параметром нельзя управлять со стойки ЧПУ</p> <p>«+» – параметром возможно управлять со стойки ЧПУ</p>		

На прессах с ЧПУ также имеется возможность управления углом поворота растяжных гидроцилиндров по координатам AL/AR. Положение каретки на гибочном рычаге является настроечным параметром. Управление положением кареток осуществляется по координатам LC/RC.

1.3. Анализ технологических схем деформирования

На гибочно-растяжном прессе, работающему по вышеописанной принципиальной схеме, существует четыре основных схемы деформирования: простое нагружение (ПН), растяжение с последующим изгибом (Р-И), изгиб-растяжение (И-Р), растяжение-изгиб-растяжение (Р-И-Р).

При простом нагружении (ПН) внешние нагрузки (осевые силы), растягивающие заготовку и изгибающие моменты растут одновременно и пропорционально единому параметру – времени. Здесь напряженное состояние

деформируемого тела однозначно определяется конечными деформациями от совокупного действия системы внешних нагрузок. В данном случае, положение нейтрального слоя зависит от соотношения растягивающих сил и изгибающих моментов. С ростом степени растяжения нейтральный слой смещаются к центру кривизны, в то время с ростом кривизны изгиба ось поворота смещается ближе к оси инерции сечения, что ведет к проблемам присущим при гибке, а именно значительной упругой отдаче заготовки при разгрузке изогнутой заготовки. Данная проблема решается применением схем сложного нагружения (Р-И, И-Р, Р-И-Р), характеризующихся одновременным действием внешних нагрузок (растягивающих сил и изгибающих моментов). При этом деформации, вызываемые последующей нагрузкой, накладываются на ранее созданное деформированное состояние [19].

При растяжении с последующим изгибом (Р-И) в заготовке первоначально создается равномерная по сечению деформация растяжения, и затем производится изгиб заготовки по формообразующей оправке, при постоянстве растягивающей силы. Основным достоинством данной схемы является управляемость, а именно в процессе формообразования возможно контролировать усилие растяжения. Однако, при достаточно больших углах гибки за один цикл, дополнительное растяжение неравномерно вдоль оси заготовки из-за наличия трения между заготовкой и инструментом, что не позволяет достаточно устранить пружинение.

При изгибе с последующим растяжением (И-Р) заготовка первоначально изгибается на кривизну формообразующей оправки, и затем в изогнутом состоянии подвергается растяжению. По данной схеме деформирования возможно изгибать заготовки на меньший относительный радиус кривизны по сравнению со схемой Р-И. Однако, чем больше угол изгиба, тем менее равномерно распределяются нормальные напряжения от усилий растяжения. По имеющимся данным [20], при коэффициенте трения 0,2 и угле изгиба равным 90° , сила растяжения в центральной зоне будет составлять 70% от силы растяжения на растяжном гидроцилиндре. В результате, применение схемы И-Р делает процесс

слабоуправляемым, что резко повышает влияние интуиции и опыта оператора гибочно-растяжного прессы на формообразование.

Схемы деформирования И-Р и Р-И применяется в одно- и двухпереходном варианте. Для осуществления деформирования за один переход, заготовку предварительно закаливают и деформируют в свежезакаленном состоянии. В случае применения двух переходов, заготовку на первом переходе деформируют в оттоженном состоянии, выполняя полный цикл деформирования по описанным последовательностям. Перед вторым переходом заготовку подвергают закалке и затем в свежезакаленном состоянии калибруют, прикладывая дополнительные усилия растяжения [20]. Исследования показали, что некоторые алюминиевые сплавы после закалки на некоторое время (до нескольких часов) приобретают повышенные пластические свойства, после чего происходит старение материала, в результате которого пластичность вновь снижается, но повышаются прочностные свойства [32]. Этим обусловлено использование свежезакаленного состояния заготовок для временного разупрочнения материала. При закалке происходит коробление – форма поясов и стенок заготовки сильно отклоняется от плоской. Точность этапа калибровки растяжением, зависит как от величины поволоки и искажений контура детали при закалке, так и от значительного разброса параметров упругой отдачи после изгиба с растяжением, обусловленного нестабильностью напряженно-деформируемого состояния материала. Поэтому операцией калибровки в холодном состоянии не всегда обеспечивается стабильность кривизны с отклонениями в пределах допуска, и детали после калибровки нуждаются в дополнительном растяжении [1].

В имеющейся литературе, на данный момент, не приведено расчетных способов учета коробления детали в результате термообработки, влияющей на несоответствие формы детали чертежам. Распределение структурных и геометрических свойств заготовки в результате коробления, как правило, носит нестабильный характер. Поэтому состояние заготовки после коробления сложно поддается изучению.

Растяжение с последующим изгибом и дополнительным растяжением (Р-И-Р) является сочетанием двух предыдущих схем сложного деформирования, с различным соотношением величин предварительного и дополнительного растяжения. Блок-схема данной технологии представлена на рисунке 1.4.



Рисунок – 1.4. Блок-схема технологии гибки с растяжением по схеме Р-И-Р

Данная схема предполагает осуществление деформирования за один переход. При использовании этой схемы силы трения также вносят элемент неуправляемости, однако применение гибочно-растяжных прессов с ЧПУ позволяют обеспечить требуемые параметры формообразования с необходимой точностью, поддерживая величину растягивающих усилий на необходимых уровнях, определяемых в зависимости от стадии деформирования.

1.4. Обзор способов совершенствования процесса гибки с растяжением

Применение описанных основных схем деформирования не всегда дает положительный результат. Данное обстоятельство связано с разбросом

механических свойств материала, условиями трения, сложности геометрии шпангоутов, а также параметров оборудования.

Все исследования, посвященные совершенствованию процесса гибки с растяжением и описанные в открытых источниках, можно условно разделить на два направления:

- интенсификация процесса формообразования гибкой с растяжением;
- адаптация разработанной схемы нагружения под действительные условия деформирования.

Исследователями были разработаны следующие способы интенсификации: циклическое изменение нагрузки в процессе формообразования [33-35]; приложение нагрузки к отдельным участкам заготовки [36]; применение дополнительных средств, прижимающих заготовку к формообразующей оправке [37, 38]; нагрев заготовки [19, 20, 37, 39]; применение вибраций [21].

Способы гибки с растяжением, при использовании циклического повышения нагрузки были разработаны и запатентованы Гусевым В.С. [33, 34] и группой исследователей под руководством Черных И.А. [35]. Способы Гусева В.С. заключаются в том, что при формообразовании суммарное усилие растяжения от цикла к циклу увеличивают. Изначально заготовку предварительно растягивают с усилием P_1 . Один цикл состоит в изгибе с увеличением усилия вплоть до усилия P_2 , получаемого при достижении требуемого начального угла гибки. По достижении начального угла гибки производится сброс усилий до значения P_1 , увеличенного на величину циклического повышения нагрузки ΔP , определяемую из соотношения:

$$1 < \frac{P_1 + \Delta P}{P_2 - P_1} < 1,1 \quad (1.1)$$

Таких циклов может быть несколько в процессе формообразования в зависимости от выбранных углов, на которых сбрасывается усилие.

Группой исследователей под руководством Черных И.А. [35] предложен способ гибки с растяжением, при использовании циклического повышения нагрузки. Заготовку также как и в способе Гусева В.С. предварительно растягивают до P_1 . Затем заготовку изгибают с одновременным увеличением усилия растяжения P_2 . По достижении изначального угла гибки, усилия растяжения сбрасывают до величины P_1 . Затем заготовку растягивают до усилия P_2 и изгибают с одновременным увеличением усилия растяжения до значения P_3 , по достижении которого производится сброс усилий до P_1 . Затем, заготовку растягивают до усилия P_3 и повторяют описанный выше цикл нагружения вплоть до достижения требуемого угла гибки.

Исследователем Скомороховым В.Д. [36] был предложен способ гибки с растяжением, позволяющий получать детали пространственной конфигурации. Усилия прикладываются не ко всему поперечному сечению заготовки, а к отдельным участкам поперечного сечения, при этом направление изгиба задают путем зажима и приложения растягивающих усилий к тому участку профиля, который является наружным по отношению к центру кривизны. Таким образом, по мере удаления зажатых участков от незажатых происходит сдвиг слоев материала в незажатых участках. После снятия растягивающих усилий за счет разности упругих напряжений и остаточных продольных деформаций, заготовка изогнется в направлении менее растянутых участков. Кривизна изогнутой детали будет зависеть от разности остаточных продольных деформаций зажатых и не зажатых участков профиля.

Пресса ПГР-6АД и ПГР-7АД могут быть снабжены доводочным раскатным устройством [37]. Ролик раскатного устройства сжимает предварительно растянутый и изогнутый профиль в радиальном направлении, перемещаясь по внешней его стороне. В результате применения раскатного устройства уменьшается величина пружинения и замалковка профиля.

Исследователем Ершовым В.И. [38] предложен способ гибки с растяжением профилей уголкового сечения вертикальной стенкой наружу, при реализации которого для формообразования используется только один растяжной гидроцилиндр. Один конец заготовки закрепляют на формообразующей оправке, другой в зажиме гибочно-растяжного прессы. После предварительного растяжения, производится гибка профиля, при которой вертикальную стенку обжимают, в то время как горизонтальную стенку раскатывают парой роликов в зоне изгиба. Суть данного способа заключается в том, что на этапе гибки в зоне гибки производят обжатие заготовки по стенке парой роликов и с помощью калибрующего ролика раскатывают пояс профиля, перпендикулярный плоскости изгиба. Данный способ повышает качество профилей за счет уменьшения закрутки.

Методы гибки с растяжением, с применением нагрева разработаны на кафедре ПЛА КГТУ им. А.Н. Туполева [37]. Существуют три варианта осуществления процесса. В первом варианте, заготовку полностью нагревают перед осуществлением процесса гибки с растяжением по одной из вышеописанных основных схем деформирования. Во втором варианте заготовку изначально деформируют изгибом или предварительно растягивают и затем изгибают. Затем в напряженном состоянии заготовку нагревают до необходимой температуры и с определенной задержкой. На заключительном этапе заготовку калибруют растяжением на 1-1,5%. Точность формообразования повышается за счет снятия внутренних напряжений в результате нагрева после того как заготовка приобрела необходимую форму, задаваемую геометрией формообразующей оправки.

Третий вариант гибки с растяжением при местном скользящем распространении зоны нагрева заготовке предложен исследователями Лысовым М.И. и Борисовым В.Г. [39]. Нагрев осуществляется только непосредственно формируемой зоной заготовки на этапе её изгиба после предварительного растяжения. Для осуществления нагрева формообразующая оправка должна быть снабжена токонесущей металлической облицовкой. Через облицовку

формообразующей оправки, в зоне, по которой происходит изгиб заготовки, пропускают электрический ток. Поскольку зона контакта расширяется по мере изгиба, то и разупрочнение металла нагревом распространяется по заготовке по мере перемещения очага деформации изгиба вдоль контура формообразующей оправки. В результате, в перемещающемся очаге деформации изгиба, последовательно, начиная от вершины, на малых углах охвата осуществляется растяжение разупрочненных нагревом элементов заготовки от ранее приложенных усилий растяжения. Так как усилия растяжения вызывают деформацию удлинения лишь в разупрочненных участках заготовки, не контактирующие (не нагретые) участки заготовки передают осевое растягивающее усилие в нагретую зону очага деформации изгиба. При таком способе изгиба с растяжением, осуществляемом поэлементно, на малых углах охвата, благодаря направленному нагреву зоны очага деформаций изгиба, устраняется тормозящее влияние трения на растяжение и во всех сечениях по длине контура детали. Борисов В.Г. [21] утверждает, что применение такого нагрева позволяет отказаться от учета пружинения и корректировки формообразующей оправки. Панферовой Е.А. [40] было проведено математическое моделирование процесса гибки с растяжением с нагревом профилей (швеллер, двутар, труба прямоугольного сечения, уголок) в программе ABAQUS. По результатам моделирования было определено, что повышение температуры формообразования на 180 °С позволяет снизить усилия, необходимые для получения детали, в среднем, на 70 %.

В середине XX века, учеными из КуАИ был разработан способ гибки с растяжением на станке ПГР с применением вибраций [41]. Для осуществления данного способа была изготовлена специальная вибрационная установка, жестко монтируемая на станине гибочно-растяжного прессы. На вибрационной установке по горизонтальным направляющим может перемещаться формообразующая оправка. Реализация способа заключается в следующем. Заготовка предварительно растягивается, и затем по мере изгиба через формообразующую оправку получает вибрации. На конечной стадии обтяжки профиля в течение

некоторого промежутка времени (10...15 с) формообразующая оправка получает от гидровибратора возвратно-поступательные движения, в результате чего периодически ослабляется контакт между формообразующей оправкой и обтягиваемым профилем. Возбуждение колебаний в контактной зоне гибки с растяжением способствует повышению степени деформации металла, а чередование нагружения с разгрузкой создает условия для повышения пластичности материала и снижения контактного трения [37], что приводит к равномерности пластических деформаций и напряжений по периметру детали.

Описанные способы интенсификации могут быть использованы как дополнительные приемы при гибке с растяжением, в особых частных случаях, когда варьирования параметрами нагружения основных схем деформирования недостаточно.

Развитию методов программного адаптивного управления гибочно-растяжных прессов посвящены работы С.С. Одингга, а также в частности диссертация Кретьова И.А., написанная под руководством С.С. Одингга [26] и подкрепленная патентом на изобретение [42]. В данной диссертации предлагается адаптировать управляющую программу, измеряя на этапе предварительного растяжения действительные механические свойства сплава. Далее производится коррекция программы деформирования на основе аналитического расчета с целью компенсации отклонений механических свойств материала заготовки. По скорректированной программе производится этап оборачивания (гибки) заготовки по обтяжному пуансону, с дальнейшей калибровкой растяжением.

В диссертации Ермолаева В.И., выполненной под руководством Б.М. Бржозовского [75] предложен способ управления изготовлением партии деталей на автоматизированной профилегибочной машине. Способ заключается в том, что при изготовлении партии первую деталь изготавливают в режиме обучения при расчетном изменении гибочного угла по перемещениям, а растяжение заготовки производят по силам с запоминанием приращений перемещений в реперных точках. По достижении выбранной конечной реперной точки n , заготовку освобождают из зажимных патронов гибочно-растяжного пресса и определяют

величину остаточного пружинения (сравнивая деталь с контуром шаблона). В зависимости от пружинения первой детали, рассчитывают методом знаковой адаптивной подналадки величину догиба по дополнительной реперной точке $n+1$. При изготовлении следующей детали, заготовку деформируют в режиме управления по перемещениям, путем растяжения заготовки с последующим изгибом путем перемещения зажимных патронов по аппроксимированной траектории, проходящей через n записанных ранее реперных точек, с дополнительным последующим догибом по реперной точке $n+1$.

Известен гибочно-растяжной пресс, на котором совместно с заготовкой деформируется специальный гибкий кабель, центр которого, закреплен на формообразующей оправке, а два конца закреплены с двух сторон на шарнирах растяжных гидроцилиндров. При любых изменениях длины гибкого кабеля, фиксируемых специальным датчиком, приводятся в движение штоки растяжных гидроцилиндров, адаптивно управляя растяжением заготовки в зависимости от действующих условий деформирования [42].

1.5. Термическая и механическая обработка при изготовлении сегментов шпангоутов из сплава В95

Сплав В95 относится к группе сплавов с цинком, магнием и медью. Сплавы этой системы обладают наиболее высокой прочностью среди всех используемых в промышленности алюминиевых сплавов. Существенного повышения пластичности и вязкости разрушения высокопрочных алюминиевых сплавов, добились ученые из ВИАМ, уменьшив содержание примесей железа и кремния до сотых долей процента [32, 44]. Такие сплавы маркируются «оч» и применяются сегодня в ответственных конструкциях самолета.

Технология изготовления сегмента шпангоута подразумевает фрезерование профиля. Фрезерование профиля рекомендуется осуществлять в твердом состоянии, так как в отожжённом состоянии алюминиевые сплавы имеют склонность к налипанию на режущий инструмент [43]. В твердом состоянии

сплав В95 удовлетворительно обрабатывается резанием. При обработке резанием следует избегать разогрева обрабатываемых поверхностей до температур превышающих 100 °С. Такой разогрев может резко снизить предел прочности сегментов шпангоута из сплава В95. Однако, наибольшее влияние на снижение предела прочности оказывают следующие факторы: затупление инструмента – фрезы, увеличение подачи, а также вращение фрезы на одном месте при входе и выходе из заготовки. Подача при фрезеровании сегментов шпангоутов должны соответствовать справочным рекомендациям [45].

Для приобретения необходимых прочностных свойств, заготовку (в отожженном состоянии) сегмента шпангоута после пластических деформаций необходимо закалить. При нагреве под закалку протекает процесс рекристаллизации. Величина рекристаллизованного зерна в основном зависит от степени пластической деформации и скорости нагрева под закалку. Особую склонность к росту зерна алюминиевые сплавы имеют при нагреве после критических степеней деформаций 2-15%. Чтобы избежать значительного роста зерна в таком случае необходимо нагрев под закалку проводить с возможно большой скоростью [46]. В качестве оборудования для закалки в условиях авиационных заводов используют рециркуляционные печи типа ПАП и селитровые ванны. Более безопасными в эксплуатации являются рециркуляционные печи. Закалка прессованных профилей из сплава В95очМ производится следующим образом: профили в заневоленном состоянии помещают в печь при температуре менее 425 °С, нагревают при максимальной скорости до температуры 460 °С и выдерживают 25 минут при температуре 465...475 °С, с последующим быстрым охлаждением в воде. Температура воды для закалки сплавов В95оч не должна превышать 60°С. Время переноса заготовки в воду не должно превышать 15 секунд, так как замедленное перемещение садки из нагревательного устройства в закалочный бак приводит к частичному распаду твердого раствора, что в свою очередь приводит к снижению механических свойств и коррозионной стойкости деталей.

После закалки сплав В95 при комнатной температуре переходит через максимум прочности от зонного к фазовому старению, что сопровождается резким ухудшением коррозионной стойкости. Поэтому необходимо после закалки, заготовки подвергать искусственному старению. Для обеспечения наилучших физико-механических свойств, старение сплава В95 рекомендуется осуществлять не более чем через 4 часа после закалки либо спустя 48 часов. Однако, период между закалкой и искусственным старением не должен превышать 10 суток [46].

В частности в начале 60-х гг. XX века, академиком И.Н. Фридляндером для сплавов с цинком, магнием и медью были разработаны режимы двухступенчатого старения Т2 и Т3 [32, 44], применяемые для деталей, к которым предъявляются повышенные требования к надежности и долговечности. Первая ступень искусственного старения производится при температурах ниже T_k (температуры растворения зон Гинье-Престона). Таким образом, на первой ступени старения сплав находится в стадии зонального старения. Основное упрочнение сплава происходит именно в процессе выдержки на первой ступени. Вторая ступень является коагуляционной и проводится при температурах выше T_k . На второй ступени старения сплав приобретает повышенные характеристики коррозионной стойкости, вязкости разрушения и электропроводности [46]. Все эти изменения вызваны усиливающимся распадом пресыщенного твердого раствора, коагуляцией частиц метастабильных фаз внутри и особенно по границам зерен, уменьшением их плотности. Чем выше температура и длительность выдержки заготовки на второй ступени старения, тем более значителен эффект повышения коррозионной стойкости, вязкости разрушения и электропроводности, однако при этом снижается прочность. В частности, при использовании режима старения Т2, предел прочности сплава В95оч снижается на 7%, а при использовании режима Т3, предел прочности сплава В95оч снижается на 14%. Двухступенчатое старение прессованных профилей из сплава В95оч производится следующим образом: первая ступень – выдержка при температуре 110...120 °С в течение 5...10 часов для режима Т2 или 2...10 часов для режима Т3; вторая ступень – выдержка при

температуре 160...170 °С в течение 8...20 часов для режима Т2 или выдержка при температуре 170..180 °С в течение 6...16 часов для режима Т3 [44, 46].

1.6. Постановка цели и основных задач исследования

В авиационной промышленности процесс формообразования профильных заготовок гибкой с растяжением является основным для получения деталей с заданной кривизной из прессованных профилей. Текущий порядок технологической подготовки производства заготовок деформируемых гибкой с растяжением представлен на рисунке 1.5.

Процесс подготовки производства деталей под формообразование гибкой с растяжением выглядит следующим образом:

- имея геометрическую модель детали и параметры пресса, разрабатывается технологическая оснастка – гибочный пуансон (формообразующая оправка) и цанговые зажимы под профиль детали;
- разрабатывается управляющая программа деформирования;
- по программе деформирования производится формообразование заготовки.

В реальном процессе формообразования гибкой с растяжением разброс механических свойств материала, условия трения, а также настроечные параметры оборудования вносят элемент случайности в процесс деформирования. Перечисленные факторы приводят к материальным и временным затратам на доработку первоначального варианта управляющей программы и средств технологического оснащения. В случае разброса механических свойств материала, проблема частично решается наработками исследований [26]. Учет действующих условий трения при программном адаптивном управлении гибочно-растяжными прессами, в предыдущих исследованиях не рассматривался.

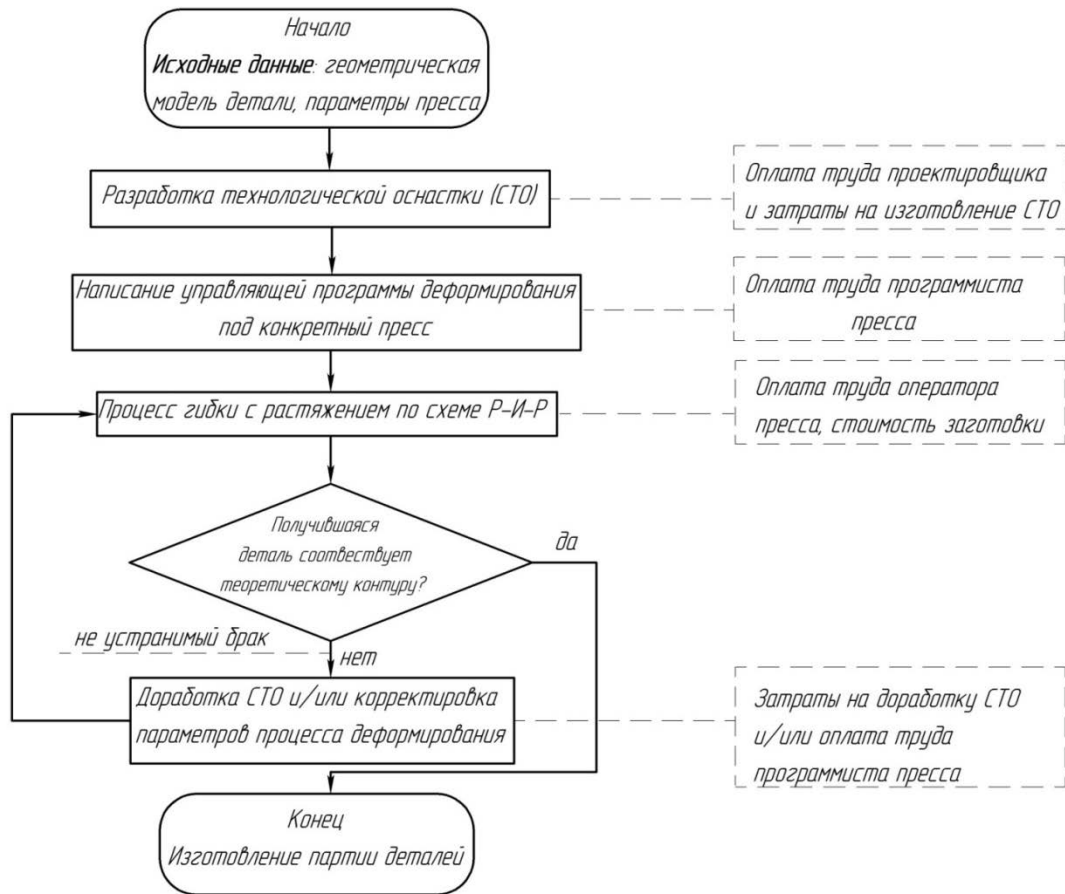


Рисунок – 1.5. Алгоритм технологической подготовки производства заготовок деформируемых гибкой с растяжением

Гибочный пуансон для формообразования в серийном производстве толстостенных прессованных профилей целесообразно изготавливать из алюминиевого сплава, например Д16Т. Выбор материала обусловлен выполнением таких требований как необходимая жесткость и экономичность, при приемлемой массе гибочного пуансона, допустимой для транспортировки кран-балкой. Так, ранее для опытного производства летательных аппаратов, использовались гибочные пуансоны из материала ДСП-Б-а. Данный материал, при контакте с алюминиевыми сплавами, обладает низким коэффициентом трения, примерно равным 0,1 [47]. При длительном изготовлении деталей по баленитовой оснастке происходит проседание поверхности пуансона, на ней возможно образование сколов, расслоение материала, что при увеличении толщины детали, а соответственно и контактного давления, выражается ещё

сильнее [48]. Сравнительные характеристики различных материалов для обтяжных пуансонов приведены в таблице 1.3.

Из таблицы 1.3 можно сделать вывод, что наиболее выгодным материалом, исходя из сравнения механических свойств, являются алюминиевые сплавы. Однако у данного материала есть такой недостаток как высокий коэффициент трения при контакте с алюминиевыми сплавами, средние значения которого равно 0,25-0,3 [47].

Таблица 1.3 – Основные характеристики материалов, применяемых в настоящее время, для изготовления гибочных пуансонов

Материал гибочного пуансона	Плотность, ρ г/см ³	Модуль упругости первого рода при сжатии, E (кгс/мм ²)	Удельная жесткость, $\frac{\sqrt{E}}{\rho}$
Алюминиевый сплав	2,7...2,8	7200	30,3
ДСП-Б-а	1,3	1500	27,7

Основным способом снижения трения при гибке с растяжением является применение жидких смазочных материалов. Необходимо отметить, что такие смазочные материалы не обеспечивают стабильных условий трения. При формообразовании, значительная доля технологической смазки переносится с формообразующей оправки на заготовку. Не стабильная толщина технологической смазки на гибочном пуансоне, ведет к значительным изменениям коэффициента трения. Коэффициент трения в зависимости от толщины слоя может изменяться на 0,1 [54]. Для обеспечения стабильного коэффициента трения при гибке с растяжением, необходимо при каждом цикле формообразования обновлять слой смазочных материалов, и контролировать слой высокоточным лабораторным оборудованием (методом измерения электрического сопротивления). В условиях серийного производства сегментов шпангоута, обновление слоя технологической смазки и её контроль по всему пуансону приведет к резкому увеличению трудоемкости изготовления.

В качестве альтернативного варианта, для снижения трения при гибке с растяжением, могут быть применены антифрикционные покрытия, приведенные в работах по исследованию трения в процессе обтяжки обшивок двойной кривизны [49-53]. В частности, предлагается использовать один из шести антифрикционных материалов:

Покрытие 1. Фторполимерный лак холодного отверждения.

Покрытие 2. Политетрафторэтиленовая пленка, обратная сторона которой покрыта высокотермостойким затвердевшим силиконовым клеем.

Покрытие 3. Смесь полимерного связующего и органического растворителя, наполненная дисульфидом молибдена и поляризованным графитом.

Покрытие 4. Смесь полимерного связующего и органического растворителя, наполненная тефлоном и дисульфидом молибдена.

Покрытие 5. Двухкомпонентная антифрикционная полиуретановая эмаль.

Покрытие 6. Композиция на водной основе, представляющая собой водную дисперсию полимеров.

Выбор материалов обусловлен положительным опытом предыдущих исследований [53]. В частности, пять покрытий из шести, наносят путем распыления в несколько слоев, с промежуточной сушкой каждого слоя. Для данных покрытий проведена оценка адгезии методом решетчатых надрезов адгезиметром «Константа КН-1». Каждое покрытие имеет адгезию соответствующую 1 баллу, достаточную для использования на обтяжном пуансоне.

Оценка трения, возникающего в процессе обтяжки, при применении антифрикционных покрытий, проводилась сравнением коэффициента трения. Каждое покрытие было нанесено на шесть образцов, проведено его отверждение, а затем определен коэффициент трения при испытаниях на машине трения МТУ-01 при силе прижима 3,24 Н и скорости вращения 200 об/мин. Такой режим был определен, согласно принятой в конструкторской практике расчет по величине произведения удельного давления на скорость $q \cdot V$ [74]. Смысл данной величины заключается в том, что при её вычислении можно проводить сравнительный

анализ с уже известными случаями выбора антифрикционных покрытий, а также варировать параметрами скорости и давления трибофизических процессов. А именно, если в триботехнических испытаниях необходимо повысить скорость скольжения, то требуется уменьшить контактное давление на определенную величину, зависящую от процессов перехода кинетической энергии во внутреннюю. Использование величины qV позволило рассчитать режим испытания антифрикционных покрытий на машине трения МТУ-01, у которой ограничивающим условием являлась высокая величина минимальной скорости вращения образца – 200 об/мин. Расчеты приведены в статье [50].

Усилие прижатия и момент трения (коэффициент трения) фиксировались каждую секунду, то есть общее количество значений для оценки качества покрытия составляло 60 измерений. После статистической обработки результатов эксперимента был рассчитан коэффициент трения.

На рисунке 1.6 показан график изменения коэффициента трения выбранных покрытий в процессе испытания.

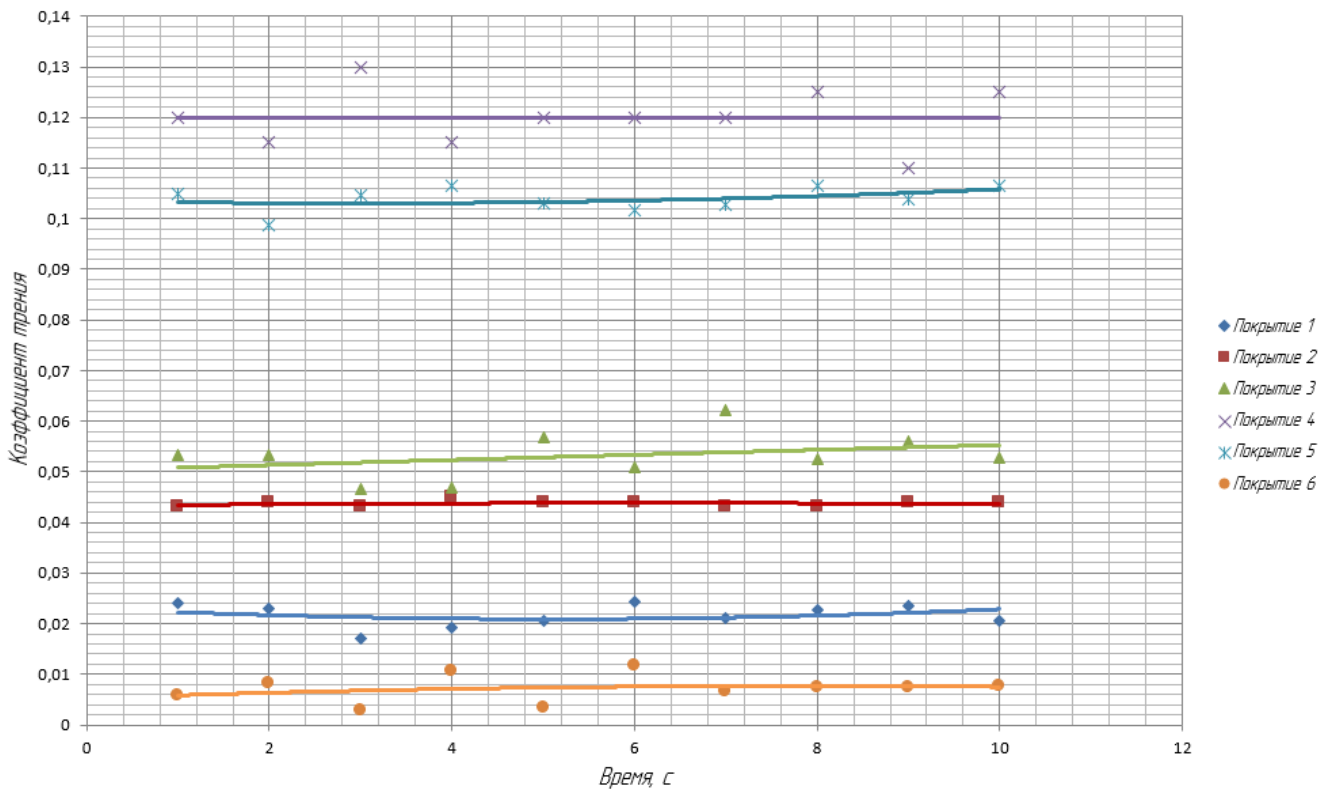


Рисунок 1.6. Графики изменения коэффициента трения

Оценка износа покрытий производилась путем взвешивания на аналитических весах ВЛ-224В образцов до и после испытания. Износ каждого покрытия за один цикл механического испытания на машине трения МТУ-01 составил не более 0,004%.

Таким образом, исследованный перечень антифрикционных покрытий может быть применен на формообразующих оправках для гибки с растяжением. Выбор антифрикционных покрытий должен осуществляться исходя из требования обеспечения достаточных условий трения при минимальной стоимости покрытия.

При применении антифрикционных покрытий на формообразующей оправке, проблема обновления слоя покрытий после каждой заготовки исчезает. Однако даже при обеспечении необходимой твердости, со временем антифрикционные покрытия изнашиваются. Изменения толщины антифрикционных покрытий приводят к изменениям коэффициента трения на 0,05. [55]. Поэтому при применении антифрикционных покрытий на формообразующей оправке, должен быть предусмотрен регламент их обновления. Чем реже обновляются антифрикционные покрытия, тем меньше трудозатрат и простоев в производстве. Вопрос уменьшения трудозатрат и простоев остро стоит при серийном производстве, на которое выходит в данный момент ответственное самолетостроительное производство.

Силу трения, возникающую в условиях гибки с растяжением возможно определить по выражению Кулона-Амонтона [56]:

$$T = \mu N + A \quad (1.2)$$

где N – сила нормального давления; μ – коэффициент трения; A – сила молекулярного воздействия. На практике, при расчетах процессов обработки металлов давлением, пренебрегают силами молекулярного воздействия, в следствие их малой величины по сравнению нормальными силами.

Соответственно касательное напряжение примет следующий вид:

$$\tau = \mu\sigma_k \quad (1.3)$$

где σ_k – нормальное напряжение при контакте.

Приведенная зависимость справедлива при $\tau < [\tau_m]$, где τ_m – сопротивление материала деформации сдвига. Для случаев, когда касательное напряжение превышает величину сопротивления материала деформации сдвига, для учета сил трения в процессах обработки металлов давлением, применяют закон Зибеля, при котором касательное напряжение трения τ пропорционально среднему по области пластического деформирования сопротивлению сдвига:

$$\tau = \psi\tau_m, \quad (1.4)$$

где ψ – коэффициент трения по Зибелю [56].

Закон Кулона-Амонтона справедлив при контакте гладких поверхностей инструментов, при наличии тонкого слоя антифрикционных материалов. Закон Зибеля справедлив при использовании инструмента с высокими значениями шероховатость поверхности, при отсутствии нанесенных на инструмент антифрикционных материалов, а также при горячей обработке давлением [57].

При наличии достаточно толстого разделительного слоя смазки, учитывают силу жидкостного трения, которая может быть вычислена исходя из закона движения вязкой жидкости Ньютона следующим образом [58]:

$$T = \eta \frac{v}{h} F, \quad (1.5)$$

где v – скорость скольжения заготовки по технологической оснастке; h – толщина слоя смазки; F – фактическая площадь поверхности контакта; η – коэффициент вязкости смазывающего материала.

Соответственно касательное напряжение примет следующий вид:

$$t = \eta \frac{v}{h}, \quad (1.6)$$

При гибке с растяжением пресованных профилей по формообразующим оправкам из алюминиевых сплавов, чаще всего применяется тонкий слой смазочных материалов, что дает возможность применять закон Кулона-Амонтона при аналитической оценке сил трения. Для оценки контактного трения в процессе гибки с растяжением, силу трения возможно определить по известной формуле Эйлера [19]:

$$P_{\mu} = \frac{e^{\mu} - 1}{e^{\mu\alpha}} P_0, \quad (1.7)$$

где P_0 – усилие растяжения заготовки; e – основание натуральных логарифмов, α – угол нормали к поверхности формообразующей оправки в рассматриваемом сечении заготовки, отложенный от нормали, определяющей, полный угол охвата формообразующей оправки α_0 (рисунок 1.7).

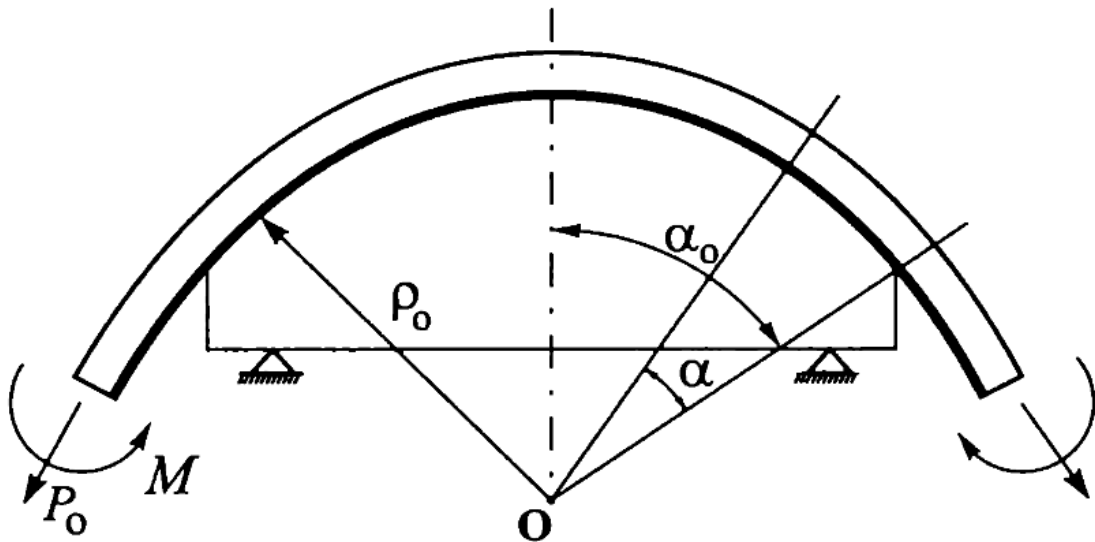


Рисунок 1.7 – Схема нагружения при изгибе с растяжением

Тогда усилие приходящееся непосредственно на деформацию растяжения волокон в произвольном сечении, отложенным углом α :

$$P_\alpha = P_0 - P_\mu \approx \frac{P_0}{e^{\mu\alpha}}, \quad (1.8)$$

Исходя из зависимости (3.7), усилие, приходящееся непосредственно на деформацию растяжения волокон в сечении, зависит от кривизны формообразующей оправки, которая учитывается положением сечений заготовки в ходе изгиба, а также от коэффициента трения, величина которого определяется условиями, при которых происходит контакт заготовки и формообразующей оправки. Изменение усилия P_α влечет за собой изменение величины деформаций. Если рассматривать условия трения в соответствии с законом Куллона-Амонтона, то в зависимости от фактической площади контакта заготовкой формообразующей оправки, изменяется нормальное напряжение при контакте. Так же в соответствии с зависимостью (1.8) истинное усилие растяжения волокон является переменным вдоль линии контакта и уменьшается по мере удаления сечений от точки сбега [19]. Данное обстоятельство говорит о том, что средние участки изогнутой заготовки при высоких значениях сил трения, остаются с более низкими значениями сил растяжения и деформаций чем крайние участки и являются зонами, от которых заготовка распружинивается.

Решением приведенных проблем технологических жидких смазочных материалов и антифрикционных покрытий является учет действующих условий трения и адаптивное изменение управляющей программы нагружения заготовки в ходе её формообразования. Адаптивно изменяя управляющую программу нагружения в режиме реального времени, отпадает необходимость контроля слоя технологической смазки высокоточным лабораторным оборудованием и увеличивается интервал обновления слоя антифрикционных покрытий. Для разработки такой системы адаптивного управления процессом формообразования

гибкой с растяжением пресованных профилей необходимо определить следующие параметры:

- величины, показывающие изменение условий трения.
- способ измерения величин, показывающих изменение условий трения
- команды, подаваемые на рабочие органы гибочно-растяжного прессы, при тех или иных величинах измерений.
- алгоритм получения возможных вариантов адаптации, на основании которых будут пересчитываться перемещения рабочих органов гибочно-растяжного прессы.

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. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Разработать алгоритм для моделирования процесса гибки с растяжением пресованного профиля под реальные условия формообразования.
- 2) Определить напряжения и деформации, которые претерпевает пресованный 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 пресованного профиля.
- 5) Провести апробацию разработанной адаптивной технологии на действующем производстве деталей самолетов.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ

В рамках диссертационного исследования было проведено исследование напряженно-деформированного состояния при гибке с растяжением заготовки сегмента шпангоута, имеющей Z-таврое поперечное сечение (рисунок 1.2), а также переменный радиус кривизны и несимметричность в продольном сечении (рисунок 2.1).

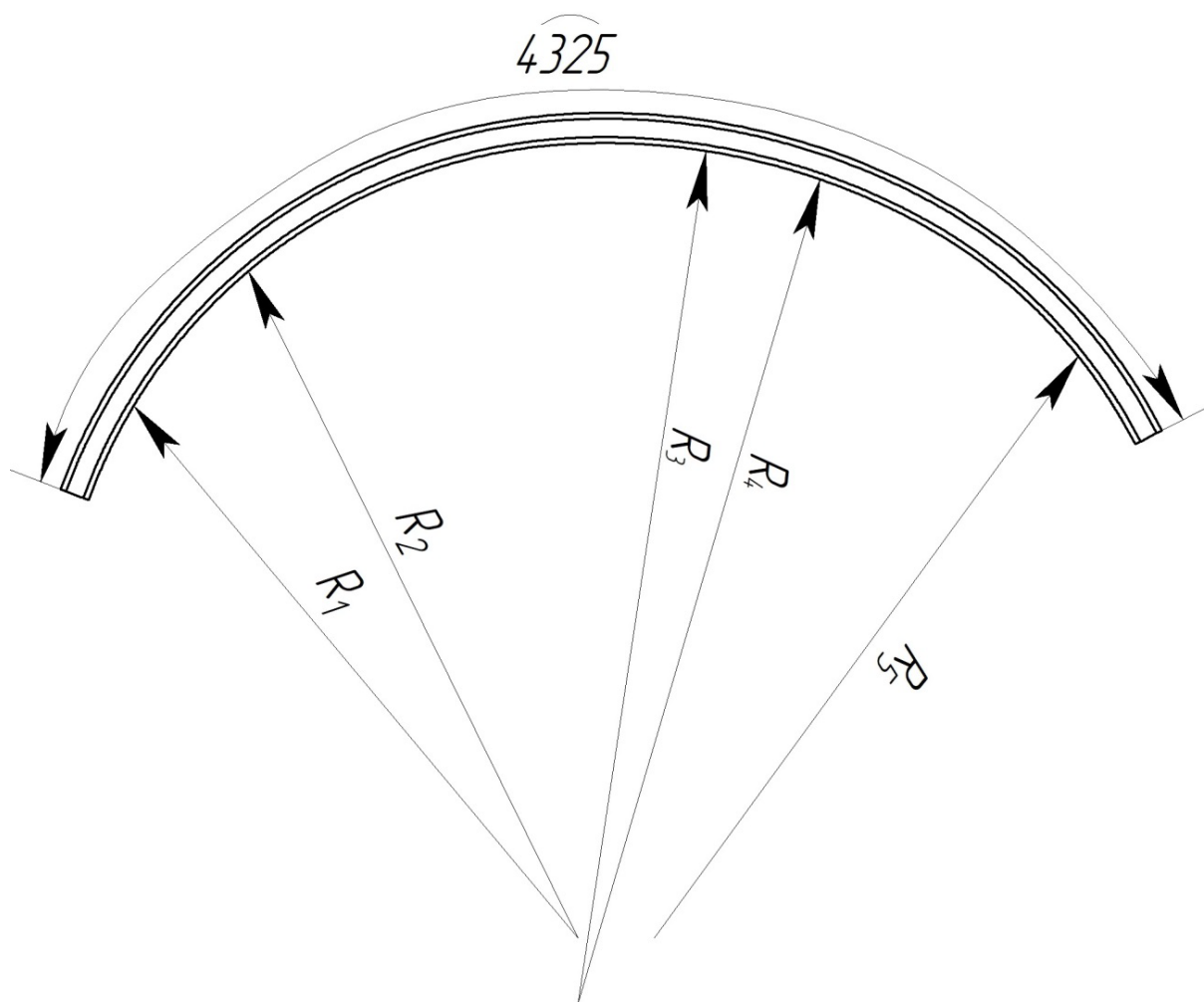


Рисунок 2.1 – Эскиз заготовки сегмента шпангоута для исследования напряженно-деформированного состояния

В качестве анализируемой схемы деформирования выбрана растяжение с последующим изгибом и дальнейшим дополнительным растяжением (Р-И-Р). Данная схема предполагает осуществление деформирования за один переход, что

позволяет изгибать контур заготовки по управляющей программе, исключая факторы мастерства, личный опыт и интуицию оператора прессы. Теоретический анализ процесса гибки с растяжением проведен на основе результатов численного эксперимента методом конечных элементов. При проведении численного эксперимента методом конечных элементов были приняты допущения:

1. Формообразующая оправка – считается абсолютно жестким телом.
2. Концы заготовки, длиной припуска на зажатие, считаются абсолютно жесткими.
3. Шероховатость поверхностей всех тел участвующих в модели – постоянная.
4. Нагружение тел принимаем квазистатическим.
5. Не учитывается исходная разнотолщинность профиля, полученная при изготовлении прессованием.
6. Материал заготовки считается изотропным.
7. Трение материала заготовки о материал формообразующей оправки полагается подчиненным закону Кулона.

2.1. Конечно-элементная модель процесса гибки с растяжением

В программе S3F, которой укомплектован пресс FEV-80, был спроектирован геометрический контур формообразующей оправки с учетом пружинения и определена длина заготовки. Конечно-элементная модель (рисунок 2.2) состояла из заготовки длиной 4700 мм (1,2), полиуретанового вкладыша (3) и формообразующей оправки (4). Полиуретановая вставка (3) применена с целью предотвращения замалковки профиля. Заготовка состоит из трех частей, связанных между собой: центральная часть (1), и два концевых участка (2), длина которых составляет величину припуска на зажатие. Центральная часть (1) выполнена в виде деформируемых твердотельных конечных элементов (MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY), в то время концы заготовки (2)

выполнены в виде жестких недеформируемых (RIGID) твердотельных конечных элементов.

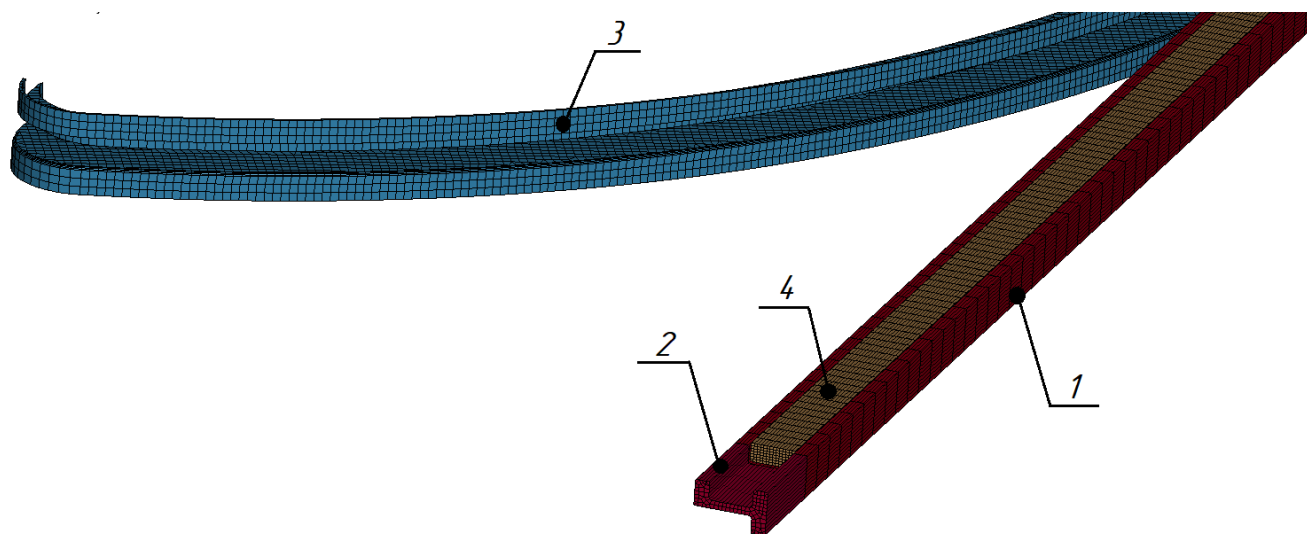


Рисунок – 2.2. Модель гибки с растяжением профильной заготовки по формообразующей оправке: 1 – деформируемая часть заготовки; 2 – часть заготовки, находящаяся в зажимах гибочно-растяжного прессы; 3 – формообразующая оправка, 4 – полиуретановая вставка

В модель материала заготовки MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, задавались следующие параметры: массовая плотность $\rho = 2850 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости 74000 МПа и коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$. Закон упрочнения задавался кривой зависимости напряжений от деформаций (рисунок 2.3), полученной при испытаниях на одноосное растяжение материала В95оч в отожженном состоянии (М). Конечная точка кривой упрочнения является началом шейкообразования образца. Кривая упрочнения, задаваемая в конечно-элементной модели, позволяет адекватно моделировать работу материала при растяжении в диапазоне возникающих напряжений и деформаций в промежутке между пределом текучести и шейкообразованием.

Конечным элементам вставки из полиуретана присвоена модель Муни-Ривлина MOONEY-RIVLIN, а тип конечных элементов – твердотельный SOLID. В модель материала Муни-Ривлина были введены коэффициенты $D_{10} = 2.42 \text{ МПа}$

и $D_{01} = 0.81$ МПа, с массовой плотностью $\rho = 1240$ кг/м³, и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,496$. Данные характеристики соответствуют полиуретану СКУ-7Л [59].

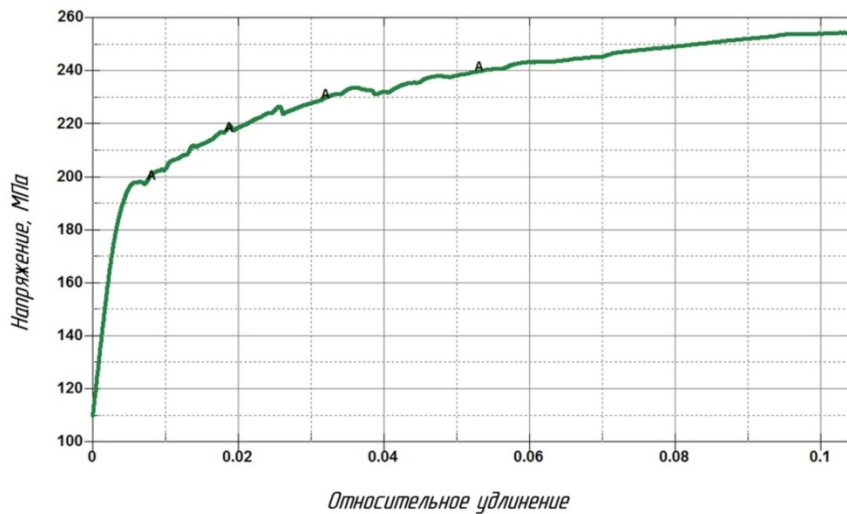


Рисунок – 2.3. Кривая упрочнения для материала В95очМ

Формообразующая оправка задавалась в виде жестких недеформируемых (RIGID) твердотельных конечных элементов, КЭ сетка задавалась только на рабочей поверхности, используя тип элемента solid, толщина которого составляет один конечный элемент. Тип контакта: профиль – формообразующая оправка и профиль - вставка – *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE.

Поскольку процесс гибки с растяжением – квазистатический, целесообразным является ускорение расчета с помощью такого инструмента как массовое масштабирование. Решатель Ls-Dyna автоматически увеличивает плотность материала элементов в зависимости от его размера так, чтобы шаг по времени, согласно критерию Куранта – Фридрихса – Леви, составил запрашиваемую величину [60]. В квазистатическом процессе не возникает резких изменений механических свойств материала, как при высокоскоростных процессах. В моделируемом процессе потенциальная энергия системы значительно выше кинетической. Поэтому для обеспечения адекватности результатов моделирования, при использовании массового масштабирования, необходимо учитывать, чтобы кинетическая энергия была значительно ниже потенциальной. Кинетическая энергия не должна быть более чем 5% от потенциальной энергии [61].

Для подтверждения данной гипотезы, было проведено тестовое моделирование процесса одноосного растяжения на цилиндрическом образце №2 типа III ГОСТ 1497-84 [62], варьируя временным шагом в версиях решателя Ls-Dyna для общей памяти (SMP) с двойной точностью и распределенной памяти (MPP) с одинарной точностью. Использование решателя с распределенной памятью MPP также позволяет значительно ускорить процесс расчета.

В тестовой модели образец был разделен сеткой, состоящей из квадратов, имеющих длину 2,5 мм. Стандартный временной шаг в модели без использования массового масштабирования составляет $1.06E-07$. По результатам моделирования производилось сравнение распределения и величин деформаций и напряжений на следующих шагах конечно-элементного анализа, выраженных абсолютным удлинением образца: 3 мм; 6 мм; 8,8мм (рисунок 2.4 - 2.7).

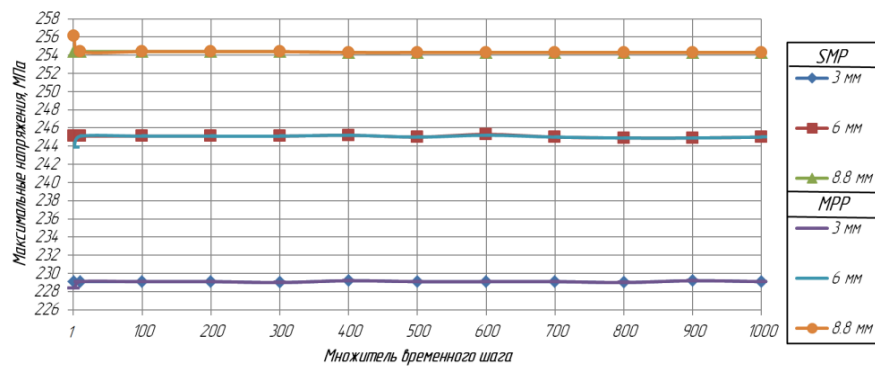


Рисунок 2.4 – Зависимость максимальных напряжений от увеличения временного шага расчета

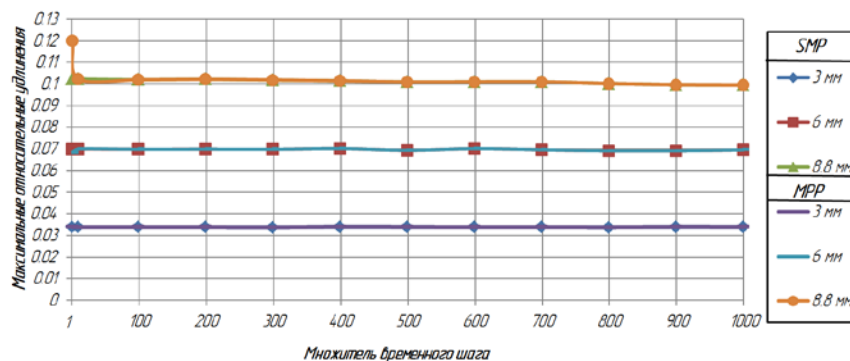


Рисунок 2.5 – Зависимость максимальных относительных удлинений от увеличения временного шага расчета

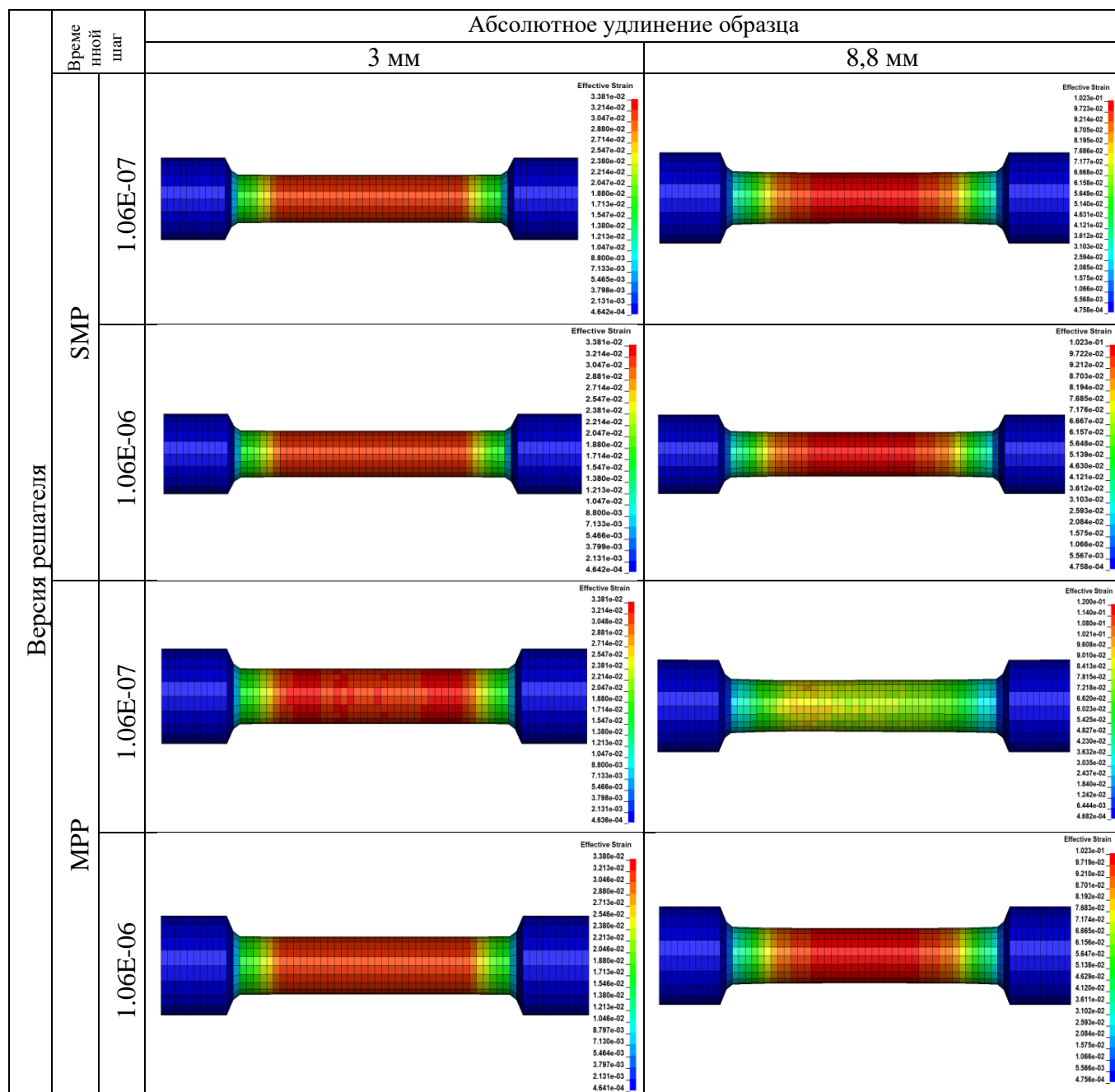


Рисунок – 2.6. Распределение деформаций удлинения по образцу в процессе одноосного растяжения при увеличении временного шага в 10 раз

При моделировании одноосного растяжения без массового масштабирования (с использованием MPP решателя), относительные деформации распределяются по заготовке хаотично, концентрируясь в отдельных, отдаленных друг от друга, конечных элементах. Однако при увеличении временного шага в 100 - 1000 раз, при использовании SMP и MPP решателей, характер распределения деформаций аналогичен.

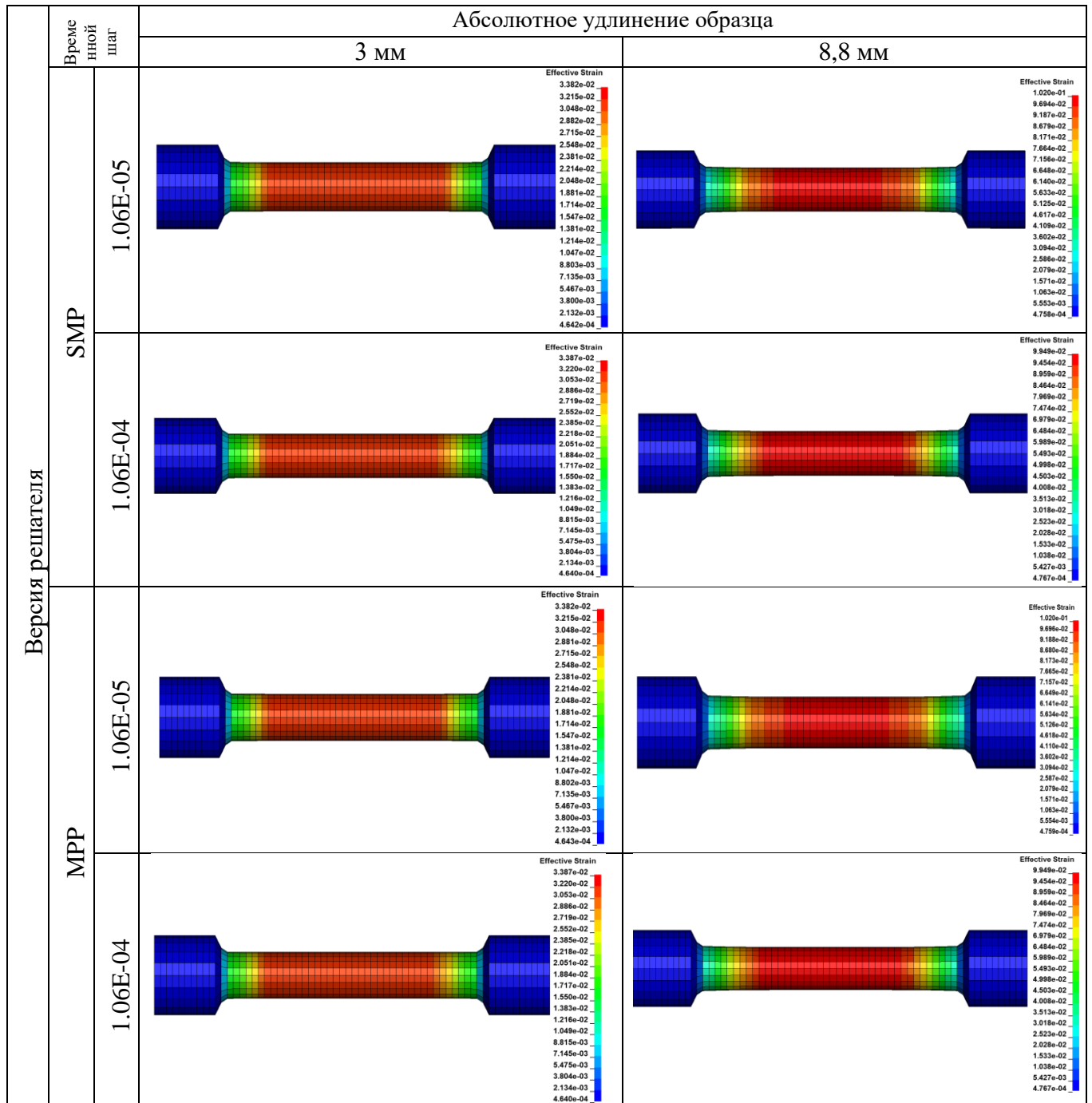


Рисунок 2.7 – Распределение деформаций удлинения по образцу в процессе одноосного растяжения при увеличении временного шага в 100; 1000 раз

Таким образом, использование MPP решателя в случае моделирования процесса при временном шаге, увеличенном в 100 раз и более, является целесообразным. Результаты тестового моделирования показывают, что напряжения при использовании одной диаграммы упрочнения практически не изменяются в зависимости от величины временного шага, однако максимальные

деформации образца с ростом величины временного шага различаются. При моделировании одноосного растяжения на временном шаге, увеличенном в 1000 раз, максимальное различие между относительными деформациями по сравнению с моделью, в которой временной шаг имеет базовую величину $1.06E-07$, составляет 7,3%. При этом результаты моделирования одноосного растяжения при временном шаге увеличенном в 500 раз имеют более низкую разницу по относительным деформациям, равную 1,5%.

Были построены кривые зависимости напряжений от относительных удлинений заготовки для центрального элемента образца H22336 и проведено сравнение с кривой упрочнения материала V95 в отожженном состоянии (рисунок 2.8).

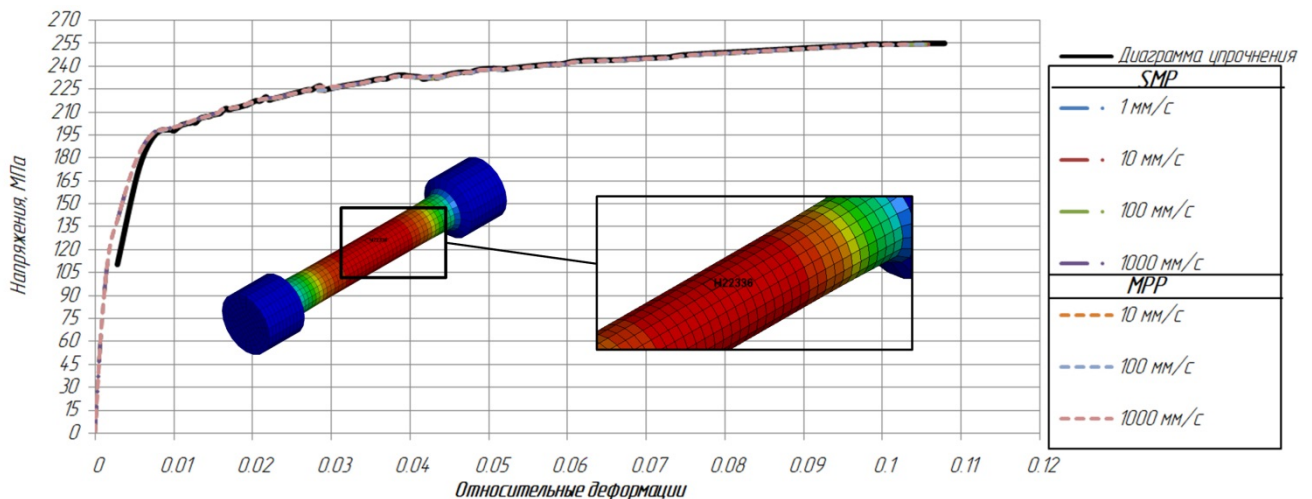


Рисунок 2.8 – Сравнение напряжений и деформаций с исходной кривой упрочнения

Таким образом, до деформации равной 0,5% зависимость напряжений от деформаций при одноосном растяжении в модели отличается от заданной кривой упрочнения. Затем, зависимость напряжений от деформаций при разных скоростях одноосного растяжения фактически накладывается на кривую упрочнения. Однако увеличение временного шага в 1000 раз, дает пониженные значения деформаций, что необходимо учитывать при расчетах.

2.2. Определение траекторий движения концов заготовки

Схема нагружения для моделирования процесса формообразования заготовки методом конечных элементов осуществлялась следующим образом. Профиль условно вставлялся в формообразующую оправку и центрировался посередине. Затем, концы профиля перемещались по заданной траектории движения согласно схеме деформирования Р-И-Р. Для расчета траекторий был спроектирован модуль для программы T-flex, позволяющий как выполнять расчеты, так и учитывать кинематические ограничения гибочно-растяжного прессы.

Расчет траекторий деформирования перемещения концов заготовки в конечно-элементной модели осуществлялся геометрическим способом. Определение траекторий производилось для двух половин заготовки. Это обусловлено тем, что продольное сечение готовой детали несимметричное. Таким образом, растяжные гидроцилиндры, шарнирно установленные на гибочных рычагах, поворачиваются так, чтобы концевые участки заготовки находились по касательной к геометрии рабочей части формообразующей оправки. При этом гибочные рычаги поворачиваются симметрично.

От линии рабочего контура формообразующей оправки, соответствующей нижней грани детали (находящейся в сжатой зоне), откладывалась эквидистантная линия «Э» на расстояние, соответствующее центру масс сечения заготовки (рисунок 2.9). Выбранное расстояние обусловлено тем, что движение в модели задается в точках, соответствующих центрам масс двух концевых участков заготовки и имеющих длину припуска на зажатие. Описанные участки заготовки в реальном процессе гибки с растяжением находятся в обжатом состоянии (в цанговых зажимах прессы) и практически не испытывают деформаций. Центр основания формообразующей оправки «О» является осью вращения вспомогательного отрезка «В». Обозначим вершину оправки точкой «О₁». В точке пересечения «О₂» вспомогательного отрезка «В» и линии «Э» откладывается отрезок «К» касательный к линии «Э», характеризующий «свисающую» часть заготовки в процессе гибки. Перпендикулярно отрезку «К»

откладывается вспомогательная линия «Н», ось вращения « O_H » которой плавающая по линии образованной отрезком « OO_1 ». Положение оси « O_H » зависит от действующего радиуса кривизны формообразующей оправки. Угол наклона отрезка «Н» относительно отрезка « OO_1 » обозначен как $\Delta\alpha_H$.

Длина откладываемого касательного отрезка Δl_K зависит от угла наклона $\Delta\alpha$ вспомогательного отрезка «В» к оси симметрии формообразующей оправки и вычисляется по формуле:

$$\Delta l_K = L_{\text{заг}} - \Delta l_{\text{экв}}, \quad (2.1)$$

где $L_{\text{заг}}$ – половина длины заготовки, за исключением половины припуска на зажатие; $\Delta l_{\text{экв}}$ – длина отрезка на линии «Э», ограниченного точками « O_1 » и « O_2 ».

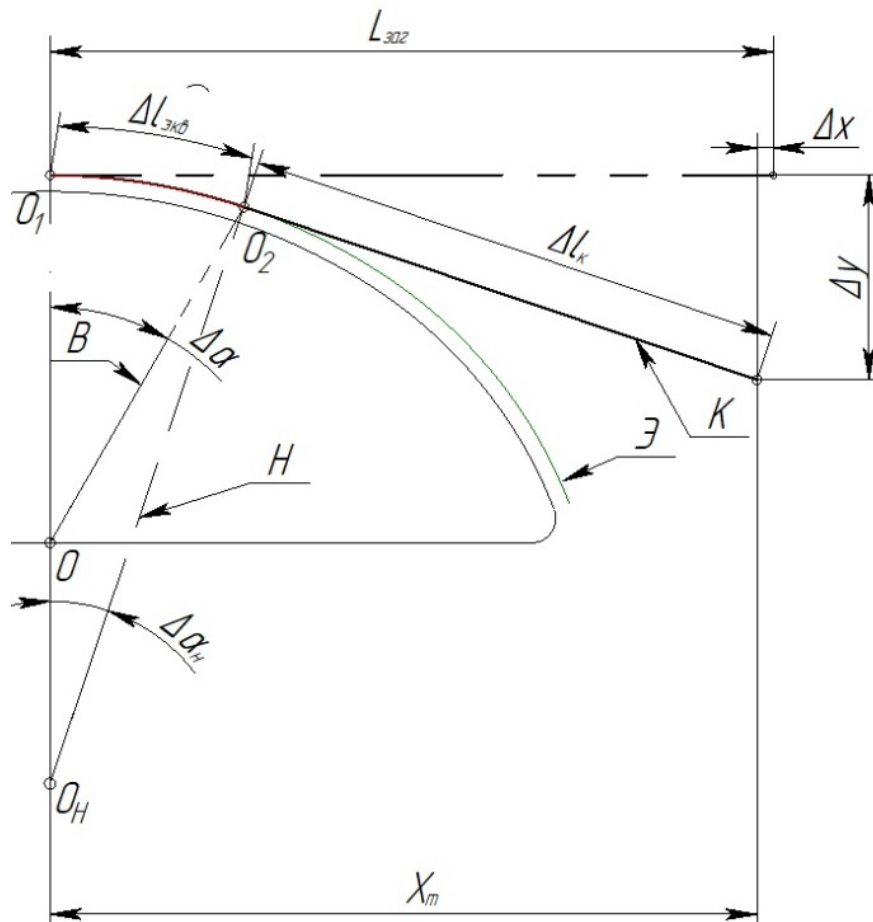


Рисунок 2.9 – Расчетная схема для определения траектории перемещения концов заготовки в конечно-элементной модели (показана одна половина гибочного формообразующей оправки)

Варьируя углом наклона $\Delta\alpha$ вспомогательного отрезка «В» относительно отрезка « OO_1 » вычисляются перемещения конца заготовки Δx и Δy (рисунок 2.9). Вычисленные перемещения определяют траекторию движения заготовки в математической модели. Полученные траектории перемещения концов заготовки в конечно-элементной модели представлены на рисунке 2.10.

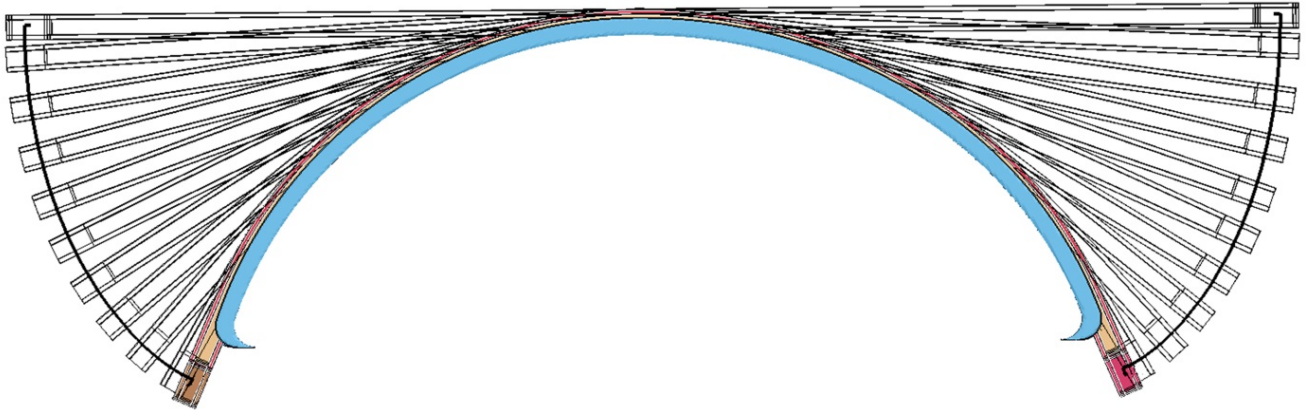


Рисунок 2.10 – План положений заготовки в процессе гибки с растяжением по расчетной траектории

С целью предотвращения выхода полученной траектории деформирования за рамки ограничений по углам поворота гибочных рычагов (не более 90°) и смещениям штоков растяжных гидроцилиндров (не более 830 мм), был произведен расчет углов поворота гибочных рычагов и смещения штока растяжных гидроцилиндров. Расчет производился по аналитической методике, изложенной в монографии [20]. Для расчета кроме описанных выше параметров, были введены координаты перемещений зажимного патрона « X_T » (рисунок 2.9) и « Y_T » в процессе изгиба, относительно вершины формообразующей оправки « O_1 ». Стоит отметить значение координаты « Y_T » равна перемещению конца заготовки Δy . Используя расчетную схему (рисунок 2.9), а именно варьируя углом наклона $\Delta\alpha$ вспомогательного отрезка «В» относительно отрезка « OO_1 » вычислялись координаты перемещений зажимного патрона « X_T » и « Y_T ». И затем, исходя из полученных координат, производился аналитический расчет для выбранного количества положений заготовки. Предварительное смещение штока гидроцилиндра растяжения на этапе калибровки задается до 1,5 % в соответствии

с рекомендациями из монографии [37]. Окончательное значение смещение штока гидроцилиндра растяжения вычислено по результатам оценки пружинения заготовки при деформировании на формообразующей оправке, выполненной с учетом пружинения.

На первом этапе, определено расстояние от оси поворота растяжного цилиндра до торца зажимного патрона перед началом изгиба « δ_0 » (положение каретки после предварительного растяжения):

$$\delta_0 = \delta_1 - \delta_p \quad (2.2)$$

где δ_p – смещение штока гидроцилиндра растяжения на этапе предварительного растяжения; δ_1 – расстояние от оси поворота растяжного цилиндра до торца зажимного патрона до начала формообразования (положение каретки).

Расчет процесса гибки проводился следующим образом: варьируя углами наклона $\Delta\alpha$ для текущего угла наклона $\Delta\alpha_n$ нормали «Н», перемещений зажимного патрона « X_T » и « Y_T » производилось вычисление текущего угла поворота растяжного гидроцилиндра относительно гибочного рычага [20]:

$$AL/AR = \arcsin\left[\frac{Y_T \cdot \cos(\Delta\alpha_n) - (X_T - \Delta\alpha_n) \cdot \sin(\Delta\alpha_n)}{L_{заг} + \delta_0 - a}\right], \quad (2.3)$$

где $L_{заг}$ – половина длины заготовки за исключением припуска на зажатие; a – расстояние от линии симметрии станка до оси поворота гибочного рычага.

Затем вычислялся текущий угол поворота гибочного рычага [20]:

$$YL/YR^\circ = \Delta\alpha_n + \Delta\gamma, \quad (2.4)$$

Текущее положение штока гидроцилиндра определялось по следующей зависимости [20]:

$$\delta' = (L + \delta_0 - a)\cos(\Delta\alpha_n - \Delta\beta) - [Y_T\sin(\Delta\alpha_n) + (X_T - a)\cos(\Delta\alpha_n)], \quad (2.5)$$

Таким образом, итоговое смещение штока растяжного гидроцилиндра:

$$XL/XR = \delta_p + \delta_0 - \delta' + \delta_k, \quad (2.6)$$

где δ_k – смещение штока гидроцилиндра растяжения на этапе калибровочного растяжения

Полученные результаты расчета представлены таблице 2.1. Выполненный расчет позволяют оценить возможность формообразования на прессе FEV-80 и сформировать управляющую программу деформирования.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов по определению траекторий деформирования и управляющим параметрам формообразования

№ кадра	Перемещения концевого участка заготовки Δx для траектории в математической модели, мм		Перемещения концевого участка заготовки Δy для траектории в математической модели, мм		Угол поворота гибочного рычага, °	Смещение штока гидроцилиндра растяжения, мм	
	L	R	L	R		YL/YR°	XL
1	-24	-24	0	0	0	24	24
2	9,24	8,84	252,51	261,81	14	49,6	50,12
3	28,26	27,36	467,36	473,42	26	110,67	114,49

Окончание таблицы 2.1

4	75,29	73,80	633,10	641,03	36	187,27	193,80
5	134,91	134,38	784,89	797,61	46	284,45	291,25
6	181,38	175,44	878,78	881,91	52	356,83	360,13
7	273,10	270,86	1025,69	1035,91	63	494,99	506,46
8	385,26	378,40	1158,62	1161,71	74	651,26	660,04
9	500,67	491,44	1256,05	1254,04	84	795,82	801,70
10	487,06	478,35	1275,81	1274,15	84	819,82	825,70

Описанный способ определения траектории был заложен в модуль расчета траекторий деформирования, выполненный в CAD системе T-flex (рисунок 2.11). В модуле в автоматическом режиме производится пересчет параметров перемещения заготовки для математической модели деформирования и перемещения рабочих органов пресса. Пользователю модуля необходимо заполнить значениями группу «Параметры, вводимые пользователем» и затем изменяя угол наклона вспомогательного отрезка к оси симметрии станка, получить выходные параметры – перемещения концевых участков заготовки, параметры управления прессом XR/XL, YR/YL.

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
# Группа: Параметр для математической модели			
deltaX_right	get("0a400053";"VALUE")	491.4487	Перемещение правоконцового участка заготовки Bx для траектории в математической модели
deltaY_right	get("0a400054";"VALUE")	1254.0429	Перемещение правоконцового участка заготовки By для траектории в математической модели
deltaX_left	get("0a40005C";"VALUE")	500.6793	Перемещение левоконцового участка заготовки Bx для траектории в математической модели
deltaY_left	get("0a40005D";"VALUE")	1256.0558	Перемещение левоконцового участка заготовки By для траектории в математической модели
# Группа: Параметр определяющий кадр деформирования			
da_right	71	71	Угол наклона вспомогательного отрезка к оси симметрии пуансона слева
da_left	74.5	74.5	Угол наклона вспомогательного отрезка к оси симметрии пуансона справа
# Группа: Параметры вводимые пользователем			
delta_1	1374	1374	Расстояние от оси поворота растяжного цилиндра до торца зажимного патрона до начала формообразования (положение каретки)
l1	140	140	Притупок на закатке
l2	1900	1900	Расстояние от линии симметрии станка до оси поворота гибочного рычага
Lcar	2350	2350	Половина длины заготовки
d_r_calibrovka	34	34	Смещение штока растяжного гидроцилиндра на этапе калибровки
d_r	34	34	Смещение штока растяжного гидроцилиндра на этапе предварительного растяжения
YLC	52.565915	52.565915	Координата центра тяжести от нижней плоскости детали по оси "Y"
# Группа: Перемещение рабочих органов пресса			
XR	d_r+delta_0-delta_left	801.700801	Текущее смещение штока правого растяжного гидроцилиндра (до калибровки)
XR_calibrovka	d_r+delta_0-delta_left+d_r_calibrovka	825.700801	Текущее смещение штока правого растяжного гидроцилиндра (после калибровки)
XL	d_r+delta_0-delta_right	795.825305	Текущее смещение штока левого растяжного гидроцилиндра (до калибровки)
XL_calibrovka	d_r+delta_0-delta_right+d_r_calibrovka	819.825305	Текущее смещение штока левого растяжного гидроцилиндра (после калибровки)
YL	get("0a400056";"VALUE")+AR	84.469307	Текущий угол поворота левого гибочного рычага
YR	get("0a400060";"VALUE")+AL	84.314416	Текущий угол поворота правого гибочного рычага
# Группа: Промежуточные вычисления			
delta_left	(Lcar-l1+d_r-delta_0-i)*cos(get("0a400056";"VALUE"))-YLC*(get("0a400057";"VALUE")+sin(get("0a400056";"VALUE"))+(get("0a400058";"VALUE"))*(get("0a400056";"VALUE")))	572.299199	Текущее положение штока левого гидроцилиндра
delta_right	(Lcar-l1+d_r-delta_0-i)*cos(get("0a400060";"VALUE"))-YLC*(get("0a40005F";"VALUE")+sin(get("0a400060";"VALUE"))+(get("0a40005E";"VALUE"))*(get("0a400060";"VALUE")))	578.174695	Текущее положение штока правого гидроцилиндра
dk1_right	Lcar-l1+d_r-get("0a3000FC";"length")	501.310175	Длина касательного отрезка для расчета траектории движения рабочих органов пресса (с правой стороны)
dk1_left	Lcar-l1+d_r-get("0a300010E";"length")	601.129597	Длина касательного отрезка для расчета траектории движения рабочих органов пресса (с левой стороны)
dk2_right	Lcar-l1/2+d_r-get("0a30000FC";"length")	571.310175	Длина касательного отрезка для КЗ модели (с правой стороны)
dk2_left	Lcar-l1/2+d_r-get("0a300010E";"length")	671.129597	Длина касательного отрезка для КЗ модели (с левой стороны)
AR	asin(get("0a400057";"VALUE")*(get("0a400056";"VALUE"))/(get("0a40005F";"VALUE"))+asin(get("0a40005E";"VALUE"))*(get("0a400056";"VALUE"))/(get("0a3000FC";"length")+dk1_right-delta_0-i))	27.469307	Текущий угол поворота правого растяжного гидроцилиндра относительно гибочного рычага
AL	asin(get("0a40005F";"VALUE")*(get("0a400060";"VALUE"))-(get("0a40005E";"VALUE"))*(get("0a400060";"VALUE"))/(get("0a300010E";"length")+dk1_left-delta_0-i))	28.814416	Текущий угол поворота левого растяжного гидроцилиндра относительно гибочного рычага
delta_0	delta_1-d_r	1350	Расстояние от оси поворота растяжного цилиндра до торца зажимного патрона перед началом изгиба

Рисунок 2.11 – Окно редактора переменных расчетного модуля

По полученным траекториям движения заготовки проведено конечно-элементное моделирование процесса гибки с растяжением для следующего ряда коэффициентов трения 0,1; 0,2; 0,3. Коэффициент трения 0,3 соответствует условиям деформирования заготовок из алюминиевых сплавов по формообразующей оправке из алюминиевого сплава без использования смазочных материалов. Коэффициент трения 0,1 соответствует условиям деформирования заготовок из алюминиевых сплавов по формообразующей оправке из алюминиевого сплава, с использованием смазочных материалов на основе графита [63].

2.3. Анализ напряженного-деформированного состояния (НДС) заготовки

2.3.1. Условия численного эксперимента

Для анализа НДС заготовки были проведены численные эксперименты в конечно-элементной модели процесса гибки с растяжением сегмента шпангоута. В ходе эксперимента заготовка деформировалась по схеме Р-И-Р по режиму, представленному в таблице 2.1. В модели производилось варьирование величиной коэффициента трения.

Для анализа деформаций получаемых заготовкой в процессе гибки с растяжением, были выбраны следующие контрольные элементы (рисунок 2.12):

- элемент №Н327070 – точка в растянутой зоне центральной части заготовки;
- элемент № Н326300 – точка в сжатой зоне центральной части заготовки;
- элемент № Н327014 – точка в растянутой зоне на свободном (не касающемся формообразующей оправки) крае заготовки;
- элемент № Н326244 – точка в сжатой зоне на свободном (не касающемся формообразующей оправки) крае заготовки.

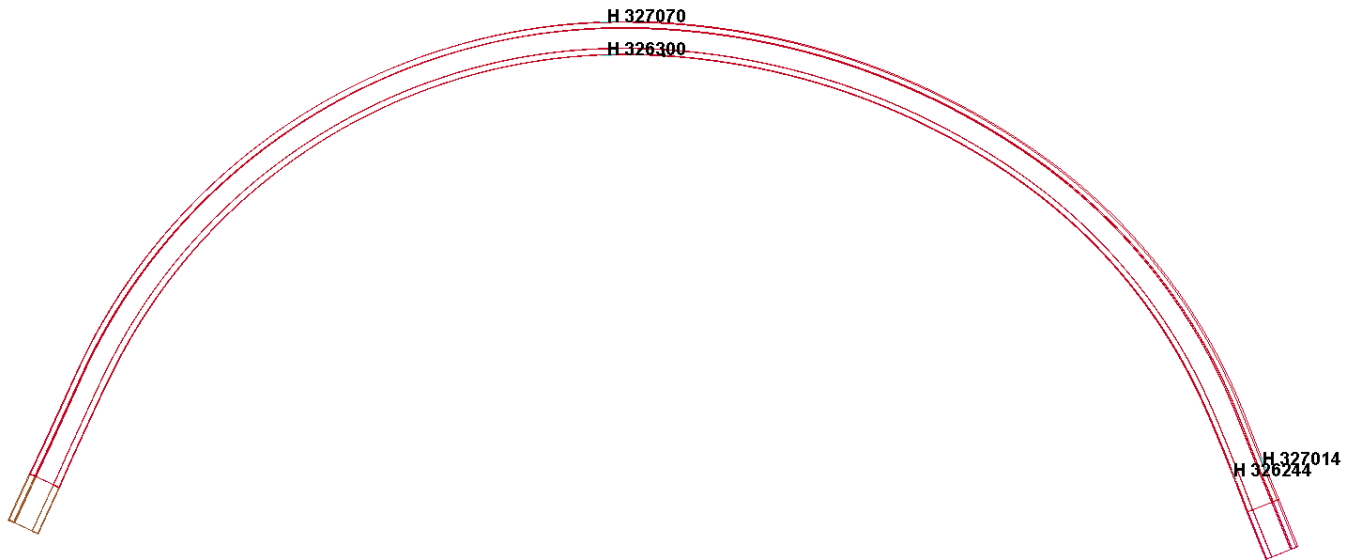


Рисунок 2.12 – Контрольные элементы: середина заготовки (327070 – растянутая зона; 326300 – сжатая зона), свободный край заготовки (327014 – растянутая зона; 326244 – сжатая зона)

2.3.2. Анализ состояния заготовки в ходе деформирования

Полученная модель процесса гибки с растяжением представлена на рисунках 2.13-2.17. На начальном этапе, заготовка была предварительно растянута. При таком одноосном растяжении, напряженно-деформированное состояние заготовки не зависит от условий трения, так как контакт заготовки и формообразующей оправки фактически отсутствует. Растяжение получено путем перемещения концов заготовки на расстояние равное 0,5 % от общей длины заготовки. На реальном гибочно-растяжном прессе, цанговые зажимы расположены на концах штоков растяжных гидроцилиндров. Таким образом, штоки гидроцилиндров, перемещаясь внутрь гильзы, растягивают концевые участки заготовки, находящиеся в цанговых зажимах. Тангенциальные деформации растяжения имели тенденцию локализации в центральном и концевых участках. Напряжения в заготовке достигли 202 МПа, что соответствует кривой упрочнения материала В95очМ (рисунок 2.3).

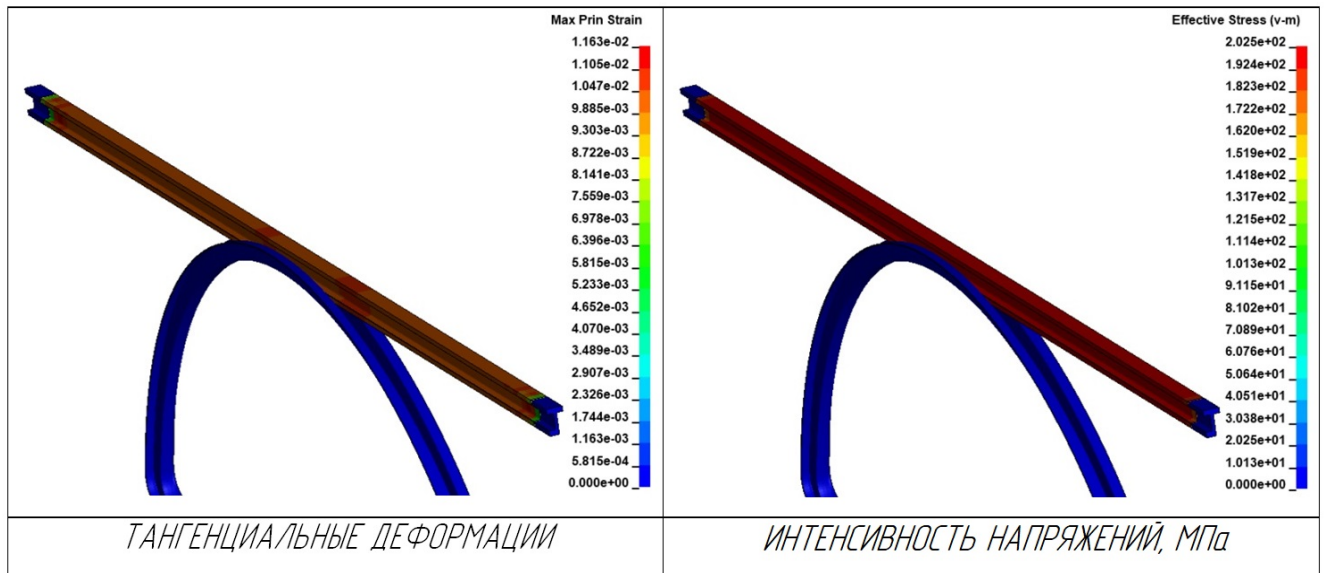


Рисунок 2.13 – Напряженно-деформированное состояние заготовки по результатам предварительного растяжения

После предварительного растяжения был произведен изгиб заготовки по формообразующей оправке. Изгиб осуществлялся до приобретения заготовкой заданной оправкой продольной кривизны. На реальном гибочно-растяжном прессе, для осуществления изгиба заготовки осуществляется поворот гибочных рычагов, на которых шарнирно закреплены растяжные гидроцилиндры. В момент поворота гибочных рычагов, растяжные гидроцилиндры поворачиваются так, чтобы концевые участки заготовки находились по касательной к рабочему контуру формообразующей оправки. При полном повороте гибочных рычагов (на 90° и более), штоки растяжных гидроцилиндров уходят внутрь гильзы, и не обеспечивают необходимой деформации растяжения и изгиба заготовки из-за конструктивных особенностей пресса. В частности если заготовку увеличить до 5 и более метров, сохраняя кривизну оправки, то изгиб до приобретения заготовкой заданной продольной кривизны, можно осуществить только в 2 и более переходов. Вторым переходом в таком случае будет заключаться в освобождении зажимов от заготовки, изменении положения кареток гибочно-растяжного пресса, перемещении штоков растяжных гидроцилиндров в исходное положение, установки в зажимы заготовки, предварительного растяжения и окончательного

изгиба заготовки. Включение второго перехода изгиба увеличивает трудоемкость формообразования в 2 раза, так как подбор положения кареток и закрепление уже изогнутого прессованного профиля в зажимы требует больших временных затрат. По результатам изгиба в модели, наибольшие величины деформаций растяжения находились в центральной части заготовки. По мере отдаления от центральной части заготовки, деформации растяжения были ниже, так что, на концах заготовки после изгиба величина деформации растяжения практически не увеличилась с момента предварительного растяжения. В зависимости от условий трения, распределение деформаций изменялось. Так, при коэффициенте трения 0,1 площадь наиболее растянутой зоны заготовки составляет $95,02 \text{ см}^2$, а при коэффициентах трения 0,2 и 0,3 составляет $50,98 \text{ см}^2$. Однако при коэффициенте трения 0,3 максимальная деформация растяжения выше на 0,1% и распределение деформаций остальных прилегающих зон также отличается (рисунки 2.14-2.16).

Калибровка растяжением производилась путем перемещения концов заготовки на расстояние равное 0,5 % от общей длины заготовки. Такое

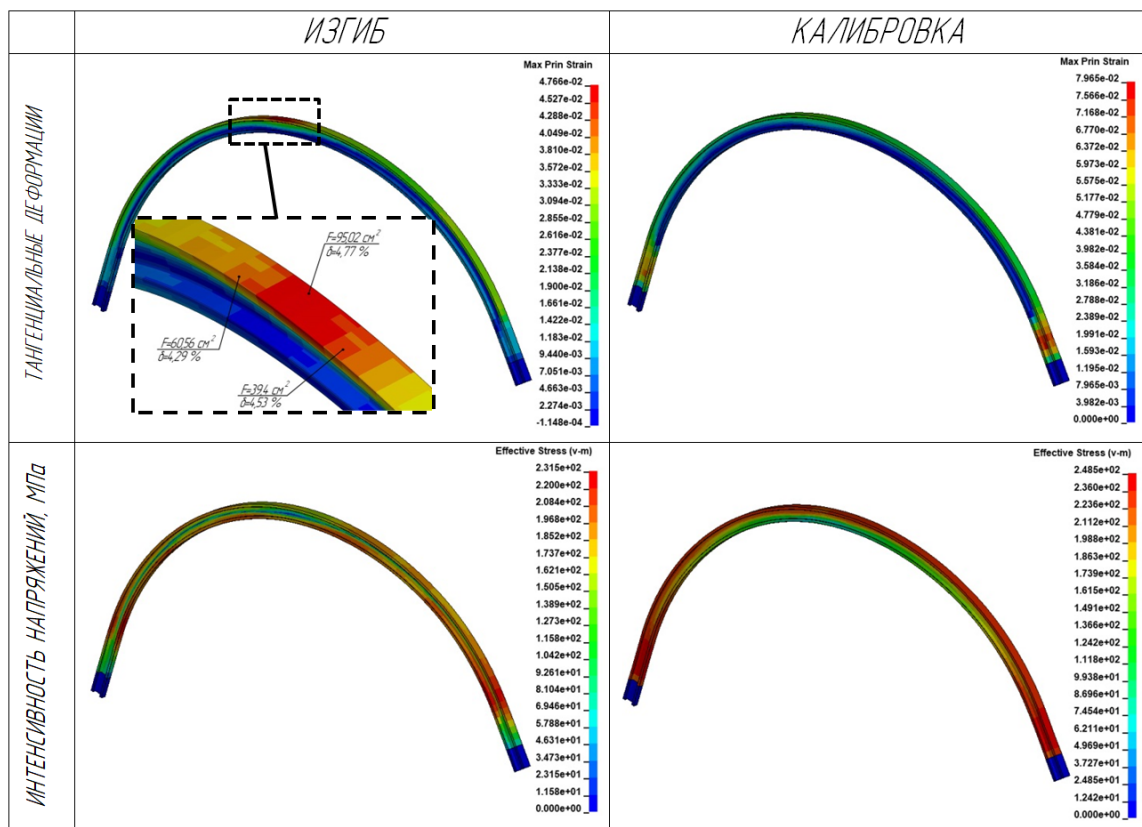


Рисунок 2.14 – Напряженно-деформированное состояние заготовки по результатам изгиба и калибровки при коэффициенте трения 0,1

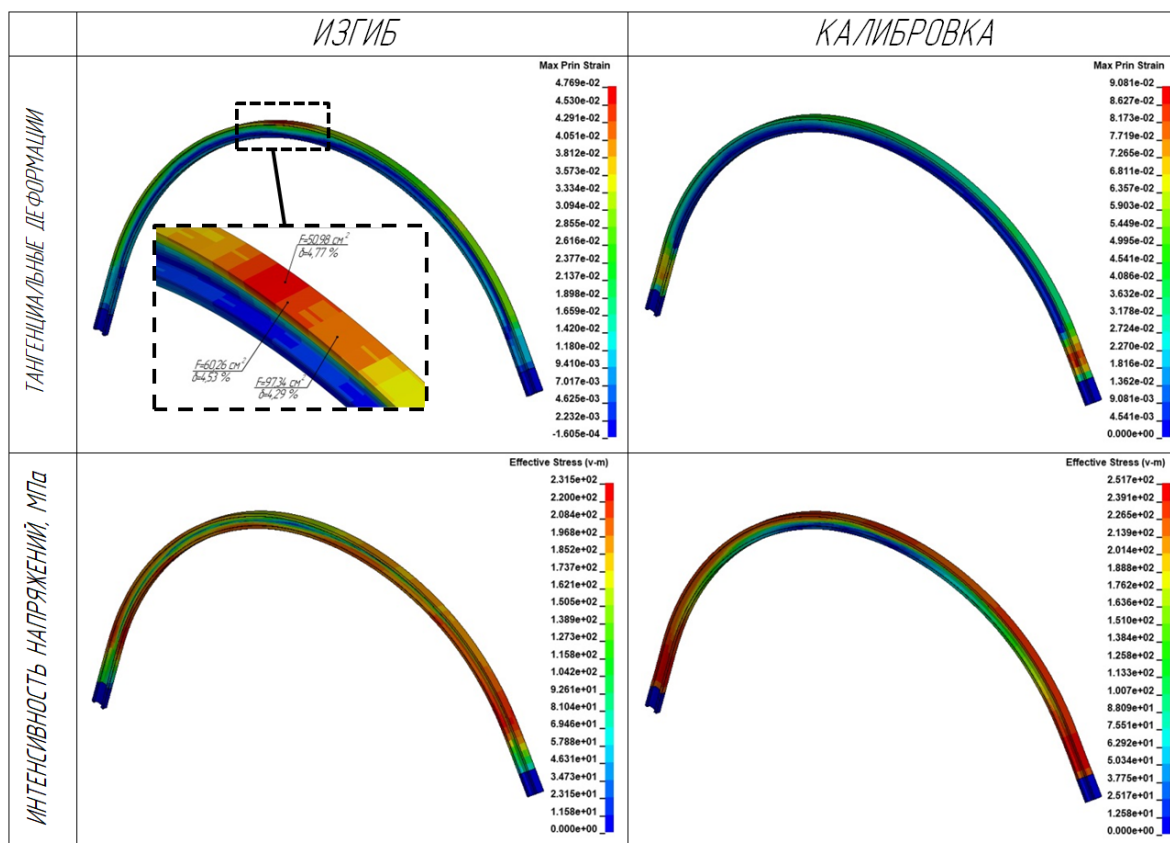


Рисунок 2.15 – Напряженно-деформированное состояние заготовки по результатам изгиба и калибровки при коэффициенте трения 0,2

растяжение заготовки на гибочно-растяжном прессе осуществляется только за счет перемещения штоков растяжных гидроцилиндров внутрь гильз. По результатам калибровки в модели, наибольшие величины деформаций растяжения локализовались в зоне у зажимов заготовки. В зависимости от условий трения, изменялись величины деформаций и напряжений. Максимальная деформация растяжения при коэффициенте трения 0,1 составляет 7,9 %, в то время как при коэффициенте трения 0,2 и 0,3 деформации растяжения составляют 9% и 9,8 % соответственно. Так, при коэффициенте трения 0,3, величина напряжений 254 МПа выходит за предельные (в соответствии с кривой упрочнения, показанной на рисунке 2.3), что свидетельствует о начале шейкообразования профиля. Соответственно при коэффициенте трения 0,3 величина предварительного растяжения должна быть менее 1%. При коэффициентах трения 0,1 и 0,2 максимальные напряжения не выходят за пределы кривой упрочнения.

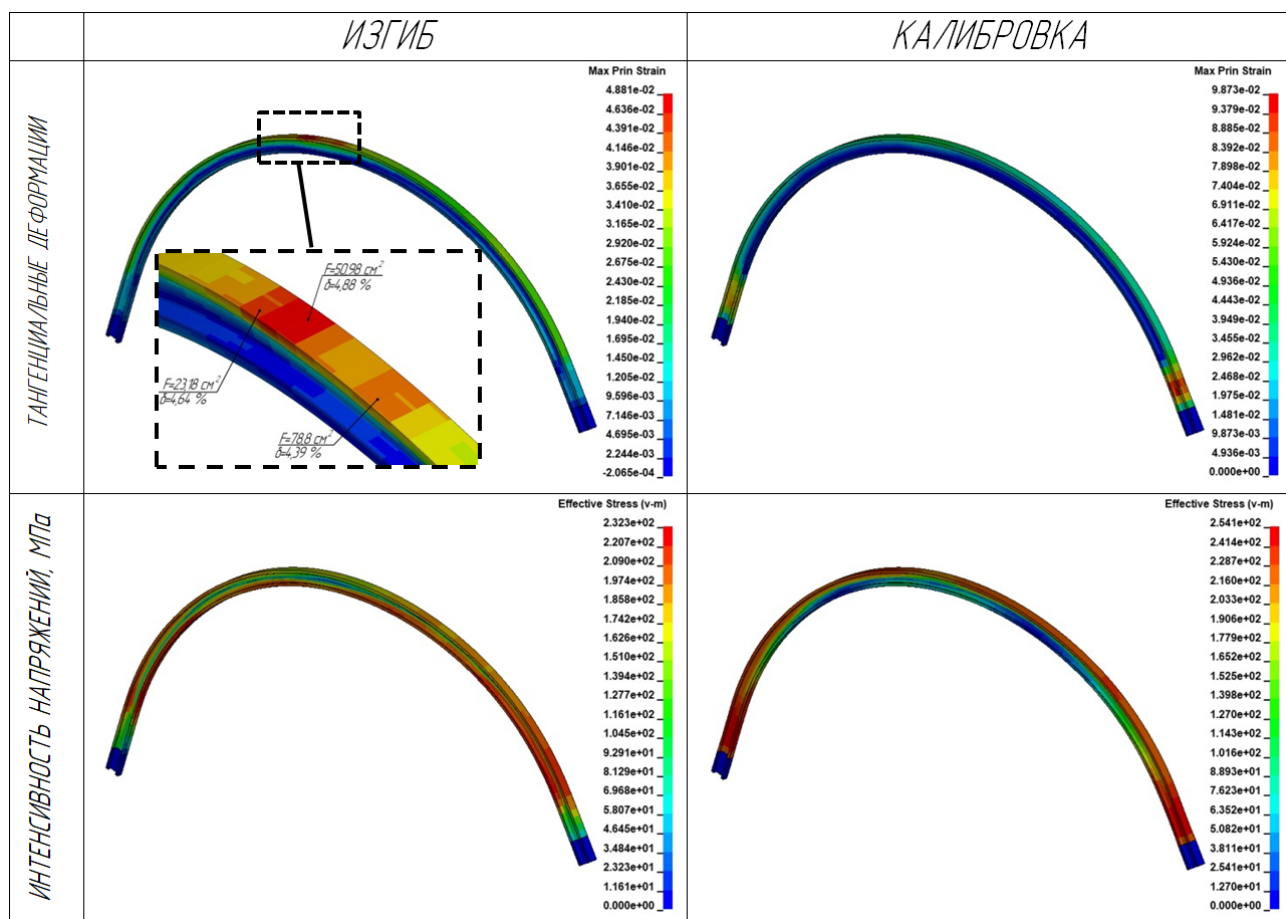


Рисунок 2.16 – Напряженно-деформированное состояние заготовки по результатам изгиба и калибровки при коэффициенте трения 0,3

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. 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 2.17).

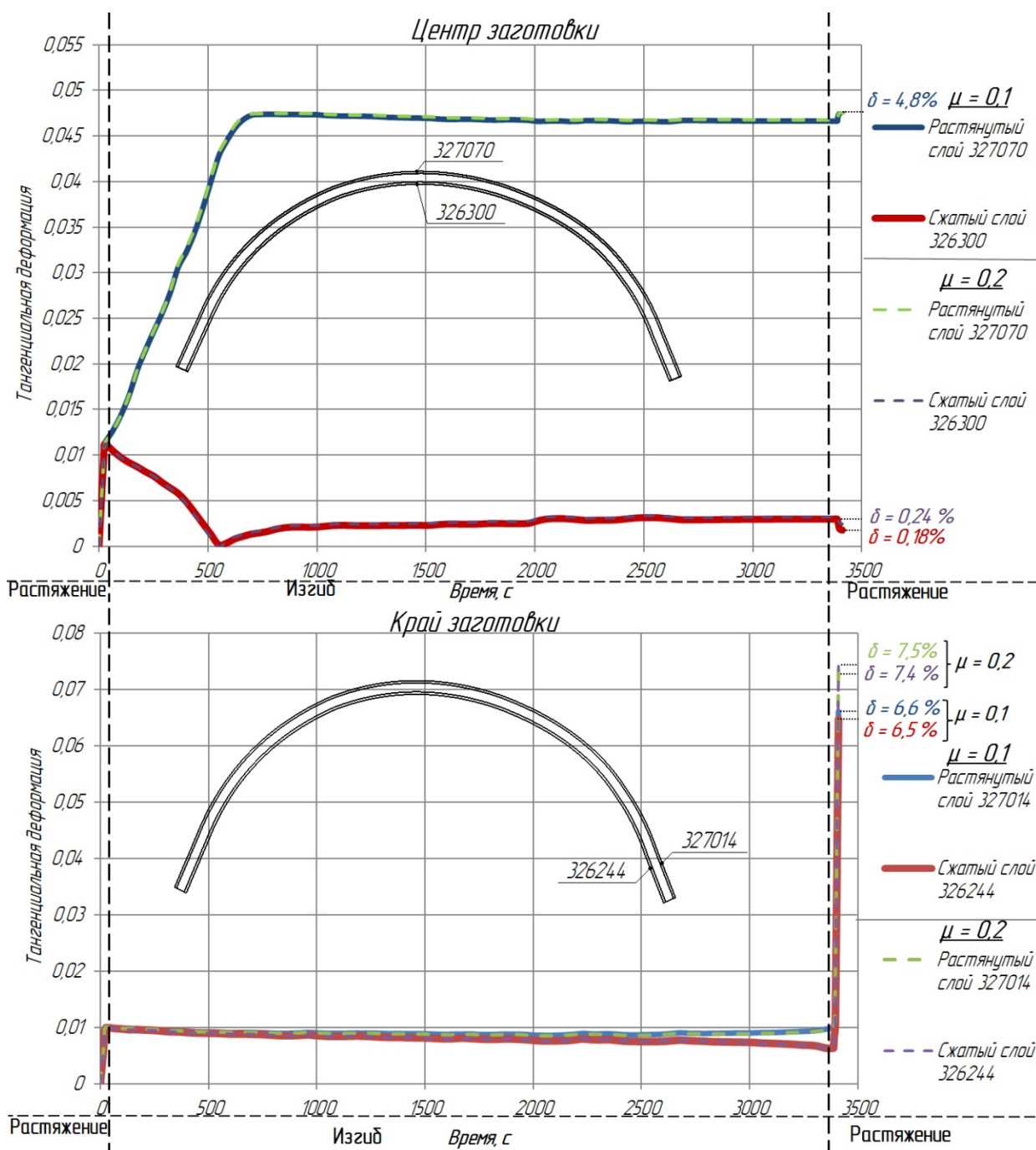


Рисунок 2.17 – Деформации растяжения для контрольных элементов: центр заготовки (327070– растянутый слой; 326300 – сжатый слой), свободный край заготовки, (327014 – растянутый слой; 326244 – сжатый слой)

Таким образом, при анализе результатов конечно-элементного моделирования, определено, что в зависимости от коэффициента трения между заготовкой и формообразующей оправкой, изменяется характер распределения деформаций, а также чем выше коэффициент трения, тем больше растягиваются края заготовки на этапе калибровочного растяжения.

2.3.3. Анализ пружинения

Для проведения сравнения пружинений в зависимости от деформаций, полученных на этапе калибровки, выбирается ряд кадров с различными значениями напряжений и деформаций из конечно-элементной модели деформирования и переносится в конечно-элементную модель для оценки пружинения. Деформация растяжения, при которой геометрическая форма заготовки соответствует форме готовой детали, является приемлимой. Затем из полученных данных формируется окончательная управляющая программа деформирования.

Пружинение деформированной профильной заготовки, полученной в результате гибки с растяжением, происходит следующим образом: внутренние силы, оказываясь неуравновешенными, производят пассивную деформацию волокон элемента в пределах линейной зависимости между напряжениями и деформациями. Этот процесс сопровождается сокращением длины заготовки и уменьшением кривизны изгиба.

Для моделирования процесса распружинивания в программе Ls-Dyna, на средние узлы заготовки были наложены ограничения, остальные элементы и узлы заготовки оставались в свободном состоянии. В процессе расчета происходила упругая разгрузка заготовки, действующие напряжения преобразовывались в остаточные, и заготовка распружинивала на величину пружинения. После моделирования деталь, импортированная в формате .stl загружалась в CAD-систему, где оценивалась величина зазора между твердотельной геометрической моделью заготовки сегмента шпангоута и полученной в результате конечно-элементного моделирования заготовки (рисунок 2.18).

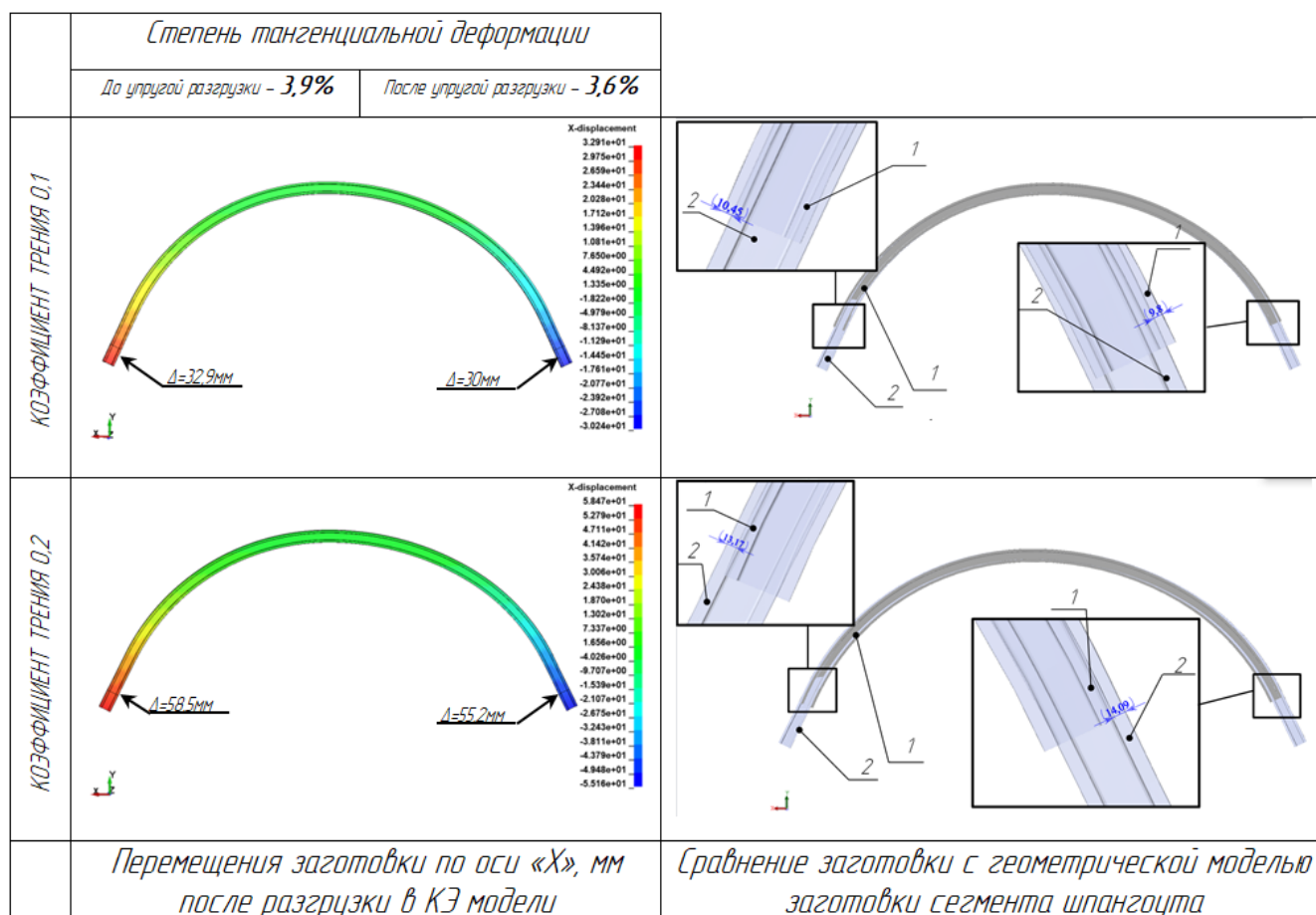


Рисунок 2.18 – Конечно-элементная модель пружинения заготовки: Δ – величина перемещения заготовки в ходе разгрузки по оси «X»

Сравнение заготовки с геометрической моделью заготовки сегмента шпангоута показало, что у заготовки, деформированной при коэффициенте трения 0,1, присутствует 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. Полученная 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 9,9% (рисунок 2.15),

в то время как шейкообразование материала заготовки происходит при удлинении, равном 11% (рисунок 2.3).

Для коэффициента трения 0,1 проведено определение требуемой величины смещения штоков растяжных гидроцилиндров, по результатам которого была получена графическая зависимость величины пружинений заготовки от смещения штоков растяжных гидроцилиндров (рисунок 2.19).

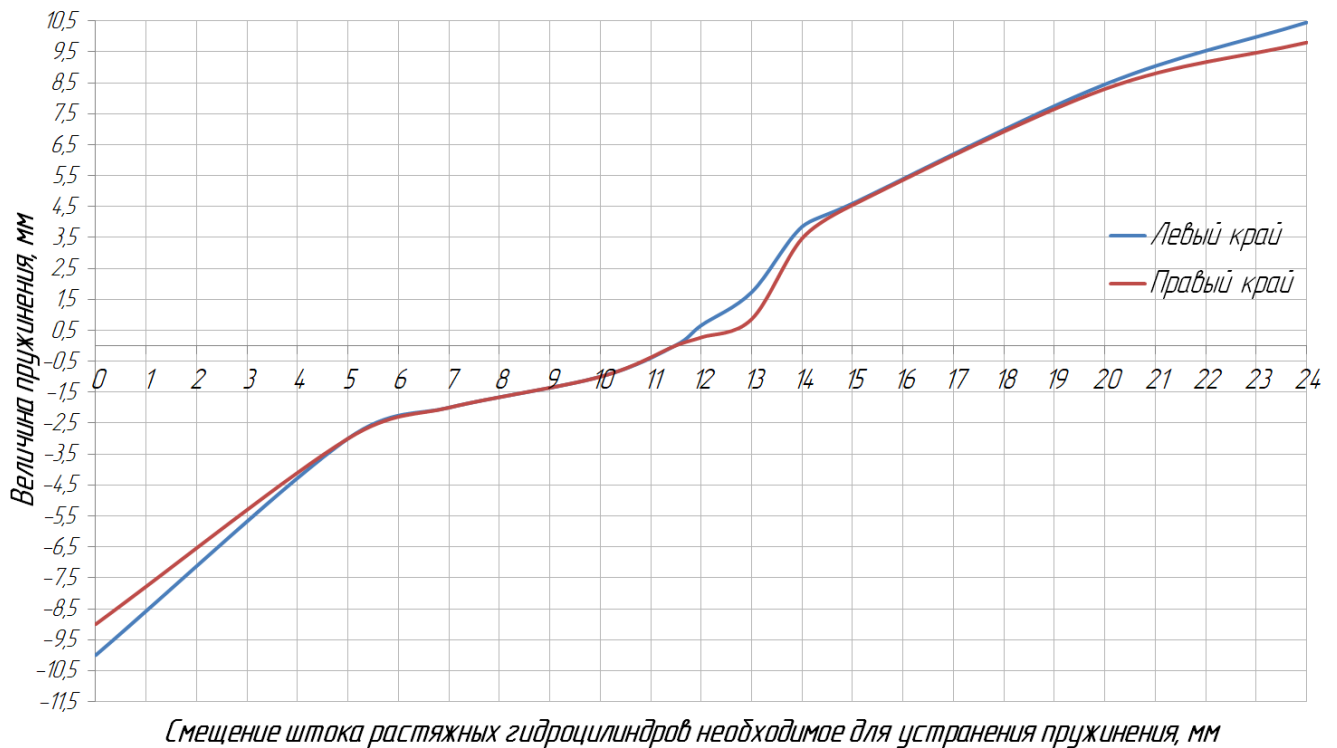


Рисунок 2.19 – Зависимость величин пружинения левого и правых краев заготовки от величины смещения штока растяжных гидроцилиндров

Таким образом, при коэффициенте трения 0,1 для осуществления калибровки, с получением рассматриваемой геометрии шпангоута достаточно втянуть шток растяжных гидроцилиндров на 11,5 мм, что соответствует 0,49% от половины длины заготовки.

Проведено конечно-элементное моделирование процесса гибки с растяжением, с дальнейшей разгрузкой и сравнением полученной заготовки с геометрической моделью заготовки сегмента шпангоута. По результатам моделирования составлена графическая зависимость необходимых для

устранения пружинений перемещений штоков растяжных гидроцилиндров от коэффициента трения (рисунок 2.20).

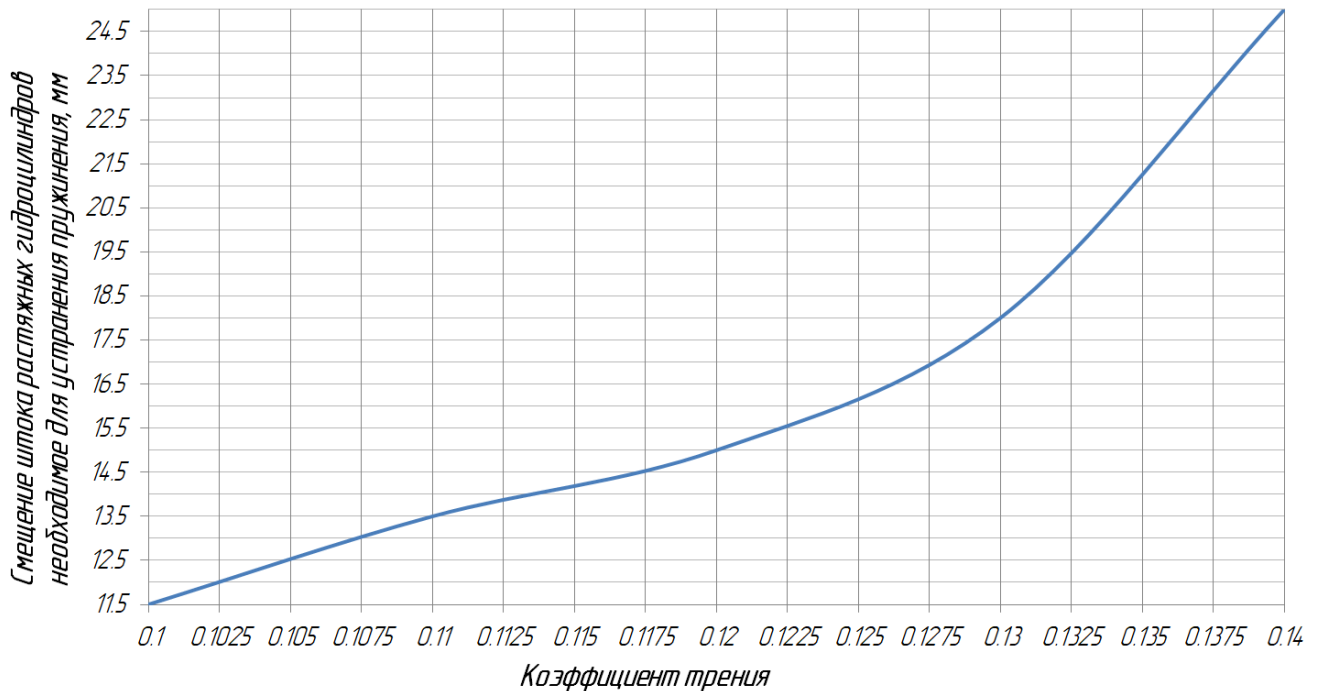


Рисунок 2.20 – Требуемые величины смещения штоков растяжных гидроцилиндров для различных коэффициентов трения, при которых будет устранено недопустимое пружинение заготовки

Полученный допустимый разброс коэффициентов трения для формообразования рассматриваемой заготовки сегмента шпангоута по спроектированной формообразующей оправке составляет от 0,1...0,14. В случае, если коэффициент трения превысит значение 0,14, для дальнейшей калибровки необходимо растягивать материал прессованного профиля до образования локализованной шейки, что повлечет за собой недопустимое уменьшение размеров поперечного сечения деформируемой заготовки. Описанные условия трения возможно обеспечить при применении антифрикционных покрытий или жидких смазочных материалов на основе графита [63]. Предлагаемое антифрикционное покрытие представляет собой смесь полимерного связующего и органического растворителя, наполненную тефлоном и дисульфидом молибдена. Данное антифрикционное покрытие испытано в рамках экспериментальных

исследований в рамках оценки антифрикционных свойств покрытий обтяжных пуансонов для возможности применения при формообразовании обшивок обтяжкой [51].

2.4. Натурный эксперимент по валидации работы разработанных конечно-элементных моделей

Проведен натурный эксперимент, в ходе которого заготовка длиной 4700 мм деформировалась на прессе V-80 по схеме Р-И-Р на формообразующей оправке, спроектированной с учетом пружинения. Заготовка перед формообразованием была разделена сеткой по растянутому и сжатому слоям заготовки. Длина измеряемых контрольных элементов сетки составляет 120 мм. Расположение элементов сетки было выполнено согласно рисунку 2.21.

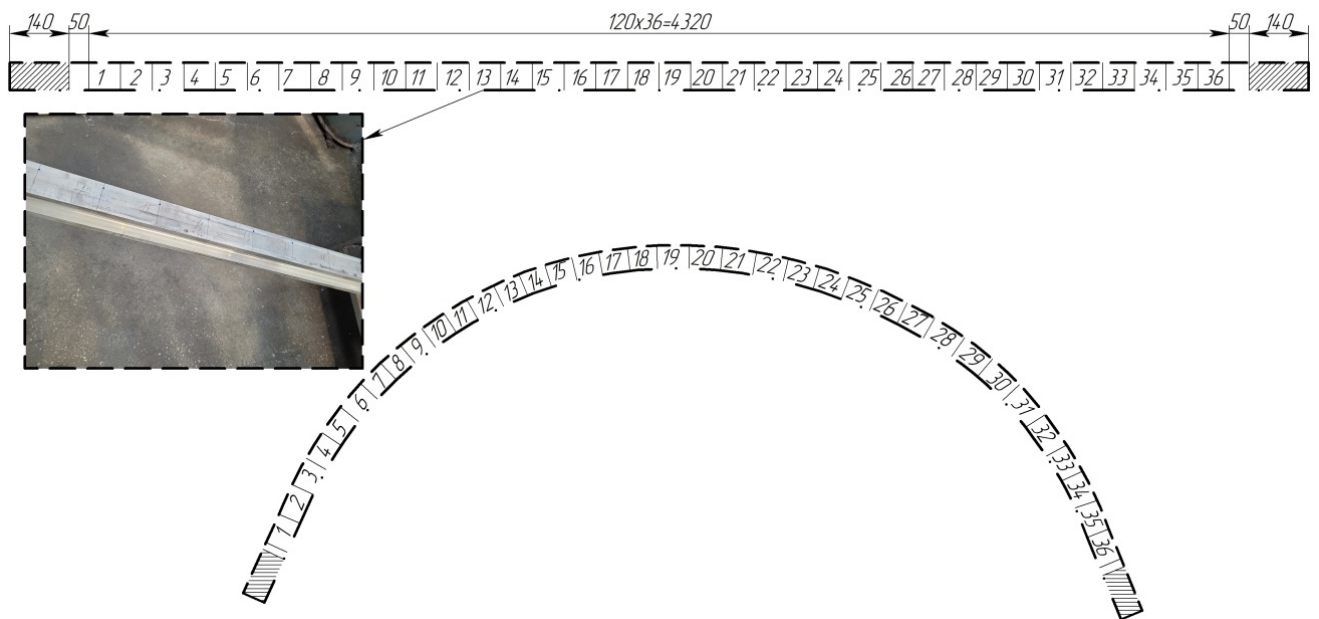


Рисунок 2.21 – Расположение контрольных элементов и их размеры на заготовке
 - - - - - – растянутый слой; - . - . - - - - - – сжатый слой

Формообразование проводилось на прессе V-80. При формообразовании были использованы расчетные параметры управляющей программы (таблица 2.1). После формообразования, на распружиненной заготовке проводилась оценка

тангенциальных деформаций контрольных элементов. Измерение абсолютных продольных деформаций контрольных элементов заготовки проводилось с помощью разметочного штангенциркуля.

По результатам измерений удлинений контрольных элементов как в модели (после разгрузки), так и на заготовке, полученной в ходе натурального эксперимента, были построены кривые распределения тангенциальных деформаций по контрольным элементам (рисунок 2.22).

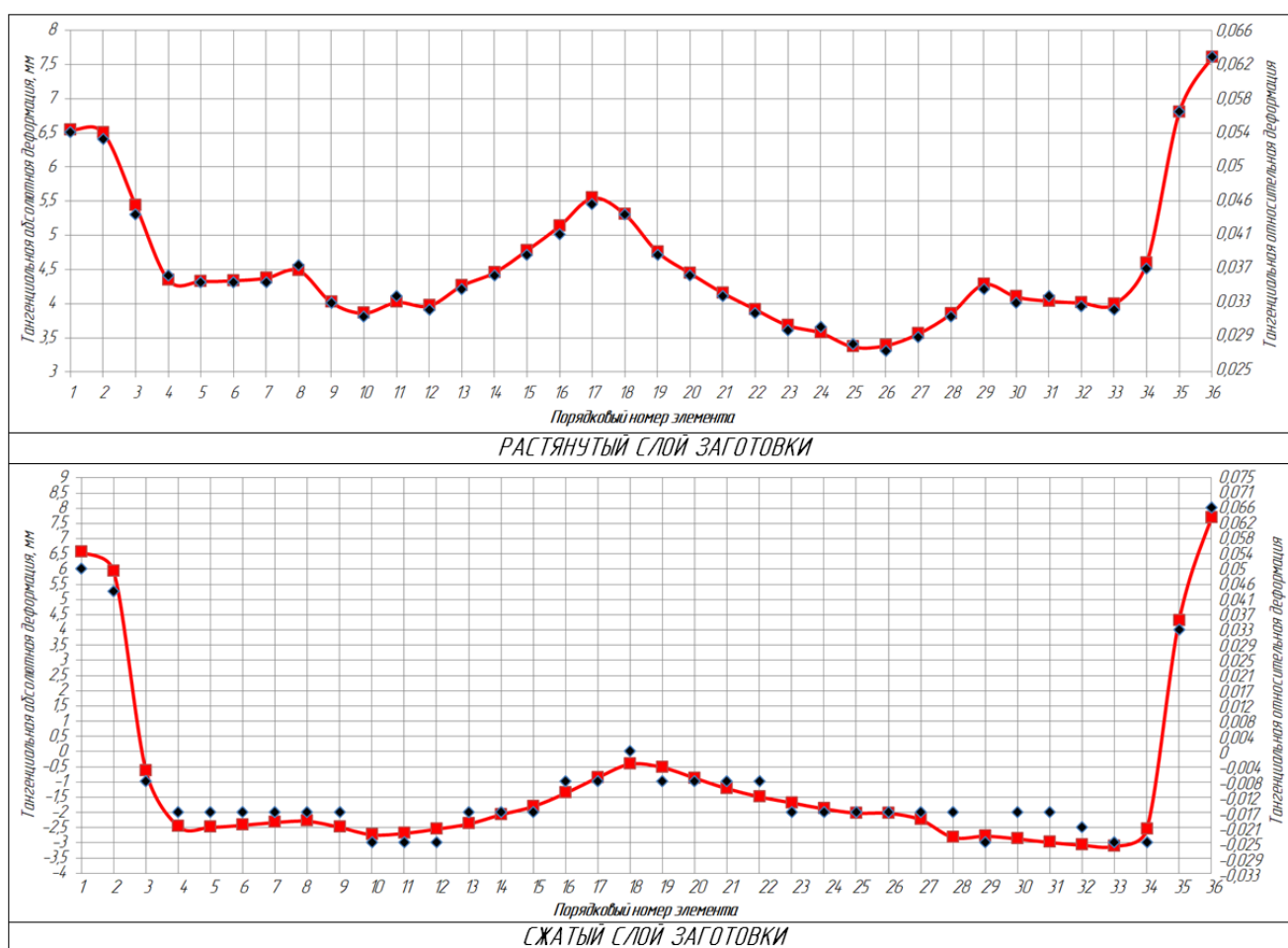


Рисунок 2.22 – Кривые распределения деформаций по контрольным элементам:

■ – данные полученные из конечно-элементной модели процесса

◆ – данные полученные из натурального эксперимента

Таким образом, максимальная разница между деформациями в модели и натурном эксперименте по растянутому слою составляет 0,2 мм. При сравнении деформаций по сжатому слою присутствует разница в деформациях – 0,5 мм, что

обусловлено тем, что конечно-элементная модель базируется на диаграмме упрочнения, полученной исходя из испытаний на одноосное растяжения. Для корректного описания процессов сжатия, необходимо использовать дополнительные уточняющие кривые упрочнения, базирующиеся на соответствующих испытаниях. В результате измерений установлено, что максимальная абсолютная деформация заготовки находится в растянутой зоне, а именно на краях заготовки и составляет 6 мм. В сжатой зоне, в зоне прилегающей к центральной части заготовки, происходит сжатие заготовки, выраженной в сужении на 3 мм. Также по графикам наблюдается, что концы заготовки, не контактирующие с формообразующей оправкой, активно растягиваются как в сжатой, так и в растянутой, о чем свидетельствуют абсолютные удлинения 6,5...7 мм в растянутой и сжатой зонах соответственно.

2.5. Алгоритм моделирования процесса гибки с растяжением

По результатам теоретического анализа процесса гибки с растяжением разработан алгоритм моделирования. Исходными данными для выполнения алгоритма являются следующие параметры:

1.Трехмерная модель заготовки в прямом состоянии со вставленным полиуретановым вкладышем (при необходимости).

2. Трехмерная модель формообразующей оправки (гибочного пуансона).

3. Механические свойства заготовки:

- плотность, ρ_3 ;
- модуль упругости, E ;
- коэффициент Пуассона, μ_3 ;
- кривая упрочнения, σ - ε .

4. Механические свойства гибочного пуансона:

- плотность, $\rho_{п}$;
- коэффициент Пуассона, $\mu_{п}$.

5. Механические свойства полиуретановой вставки (при необходимости):

- ПЛОТНОСТЬ, $\rho_{вст}$.
- коэффициент Пуассона, $\mu_{вст}$;
- коэффициенты Муни Ривлина, C_{01} , C_{10} .

6. Коэффициент трения Кулона-Амонтона:

- между заготовкой и гибочным пуансоном, $\mu_{з+п}$;
- между заготовкой и полиуретановой вставкой (при необходимости), $\mu_{з+вст}$.

7. Кинематические параметры гибочно-растяжного прессы:

- расстояние от линии симметрии станка до оси поворота гибочного рычага, a ;
- максимальное смещение штоков растяжных гидроцилиндров, $[\delta]$;
- максимальный угол поворота гибочных рычагов, $[YL/YR]$.

8. Трехмерная модель заготовки в согнутом состоянии.

На начальном этапе осуществляется расчет траекторий деформирования по схеме Р-И-Р в разработанном модуле программы T-Flex. По параметрам $[\delta]$, $[YL/YR]$ оценивается возможность осуществления формообразования за один переход на выбранном гибочно-растяжном прессе. Затем, производится конечно-элементное моделирование процесса гибки с растяжением, с использованием рассчитанных траекторий деформирования, геометрических моделей заготовки, гибочного пуансона и полиуретановой вставки. В модель вводятся механические свойства заготовки, гибочного пуансона и полиуретановой вставки, и коэффициенты трения. После моделирования процесса гибки с растяжением, осуществляется проверка выхода напряжений и деформаций за ограничения, регламентируемые кривой упрочнения.

Заключительным этапом выполнения алгоритма является моделирование пружинения заготовки и проверка соответствия полученной заготовки в разработанной конечно-элементной модели форме заготовки из геометрической модели (соответствующей операционному эскизу либо конструкторской документации деформированного прессованого профиля). В алгоритме предусмотрены проверки на каждом из этапов моделирования процесса гибки с растяжением.

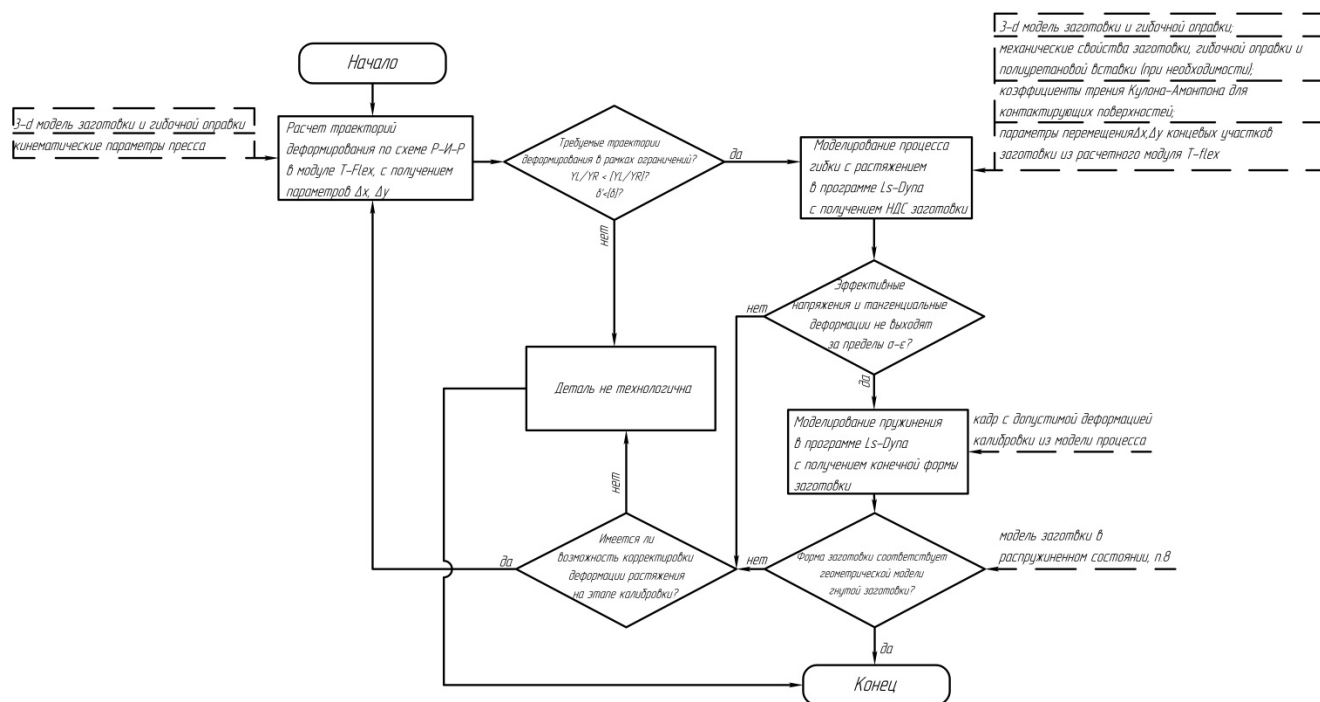


Рисунок 2.23 – Алгоритм моделирования процесса гибки с растяжением

В случае, если работа по алгоритму приводит к блоку «Деталь не технологична», необходимо выбрать другой пресс для формообразования гибки с растяжением, либо деформировать заготовку в два и более перехода, что приведет к значительному увеличению трудоемкости, которое в рамках серийного производства не допустимо.

2.6. Выводы по главе

1. Разработана конечно-элементная модель формообразования прессованных профилей гибкой с растяжением.
2. Разработан модуль расчета траекторий деформирования, позволяющий рассчитывать как траектории деформирования для конечно-элементной модели, так и программируемые перемещения рабочих органов пресса.
3. Разработана конечно-элементная модель пружинения после формообразования прессованных профилей гибкой с растяжением.

4. Разработан алгоритм для моделирования процесса гибки с растяжением прессованного профиля под реальные условия формообразования.
5. Исследовано напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе гибки с растяжением прессованного толстостенного профиля.
6. Произведена оценка влияния временного шага в конечно-элементной модели на разброс величин получаемых напряжений и деформаций.
7. Определен диапазон разброса коэффициентов трения, в котором возможно получить бездефектные заготовки сегментов шпангоутов.
8. Произведена валидация разработанных конечно-элементных моделей в рамках натурного эксперимента по деформированию и разгрузки заготовки. Максимальная разница между полученными деформациями заготовки после разгрузки в модели и натурном эксперименте составляет 0,2 мм и 0,5 мм по растянутому и сжатому слоям соответственно.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ

Реализация процесса адаптивного управления технологическими режимами гибки с растяжением зависит от множества факторов, таких как:

- возможности получения данных о текущем состоянии заготовки в режиме реального времени;
- наличия на гибочно-растяжном оборудовании системы числового программного управления и датчиков, отслеживающих текущее состояние рабочих органов пресса;
- адекватности математического моделирования возможных вариантов адаптации;
- корректности работы оборудования и программного обеспечения для адаптации управляющей программы нагружения и др.

В первую очередь, необходимо определить физическую величину, которая будет характеризовать фактические условия трения в процессе деформирования. Важным является выбор способа измерения такой физической величины. Выбранный способ измерения должен быть осуществимым в условиях серийного производства деталей гибкой с растяжением, без значительных непроизводительных затрат материальных и трудовых ресурсов.

3.1. Выбор физической величины, характеризующей фактические условия трения в процессе деформирования и способа её измерения

По результатам анализа в 1 и 2 главе диссертационного исследования, при гибке с растяжением, в зависимости от условий трения изменяются величины истинных усилий растяжения (раздел 1.3) и деформаций (раздел 2.3.2).

Усилие, приходящееся непосредственно на деформацию растяжения волокон в произвольном сечении в зоне контакта с технологической оснасткой, возможно оценить косвенно по зависимости (1.8):

$$P_{\alpha} = P_0 - P_{\mu} \approx \frac{P_0}{e^{\mu\alpha}},$$

Следовательно, коэффициент трения Кулона-Амонтона, можно записать как:

$$\mu = -\frac{\ln\left(\frac{P_{\alpha}}{P_0}\right)}{\alpha} \quad (3.1)$$

Таким образом, для определения коэффициента трения, являющегося индикатором условий трения в реальном процессе гибки с растяжением, необходимо измерить действующие усилия P_{α} в конкретном сечении на угле α . Величины P_0 возможно получить с датчиков, измеряющих усилия на растяжных гидроцилиндрах гибочно-растяжного пресса.

Измерение усилия деформирования в выбранном сечении заготовки возможно осуществить закрепив на заготовке, в выбранном сечении тензодатчик s-образного типа. Одним из способов крепления на заготовке является применение торцевых струбцин, закрепленных на заготовке по обе стороны датчика (рисунок 3.1).

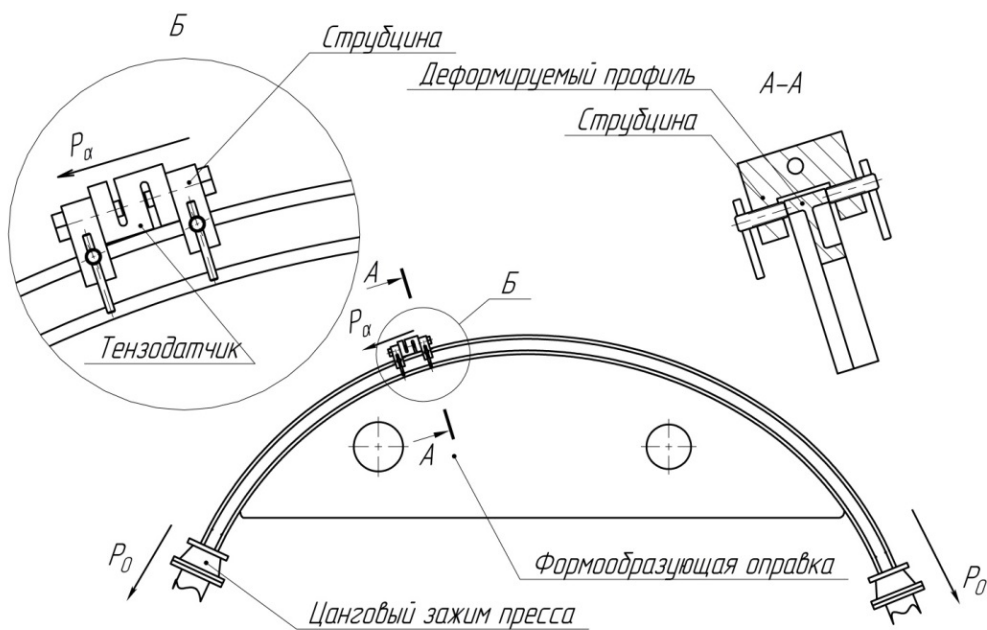


Рисунок 3.1 – Схема измерения усилия P_{α} в выбранном сечении на заготовке в процессе гибки с растяжением

При использовании описываемой схемы индикации условий трения, тензодатчик должен быть закреплен на заготовке, в сечении которым она находится в контакте с формообразующей оправкой (гибочным пуансоном). Такое местоположение позволит показывать разницу между величинами действующих усилий P_a и усилий растяжных гидроцилиндров P_0 , что приведет к корректности определения условий трения.

В рамках диссертационного исследования, при теоретическом анализе процесса гибки с растяжением было определено, что в процессе калибровки при одной и той же степени растяжения заготовки, но разных коэффициентах трения, имеется разница между полученными локальными деформациями растяжения на концевых участках заготовки (рисунок 3.2).

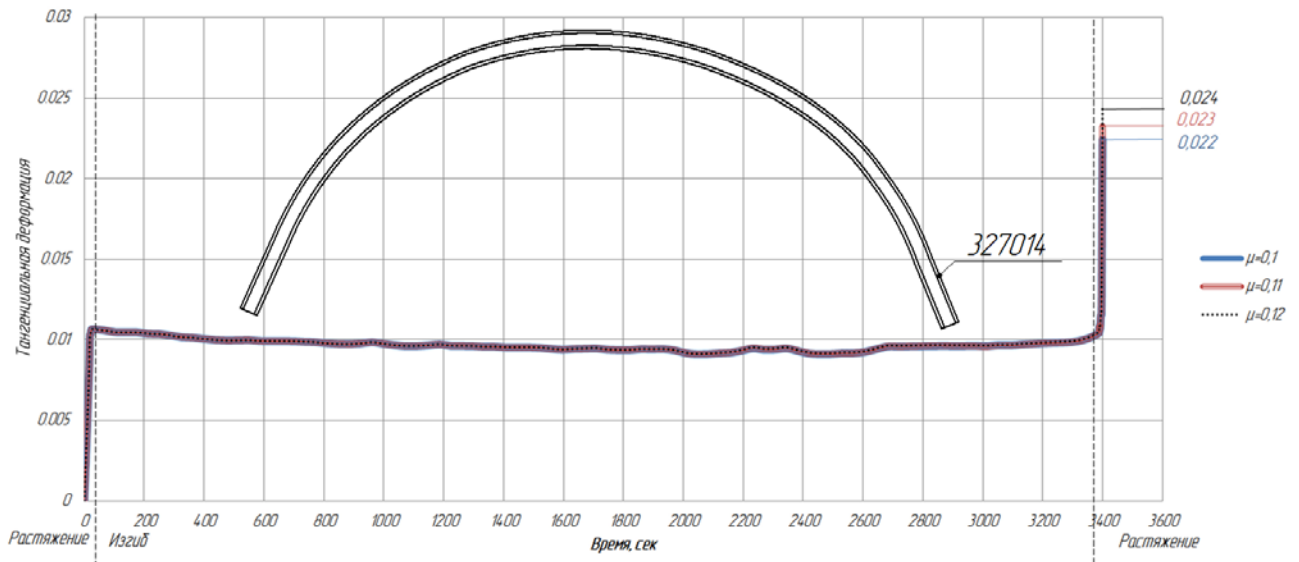


Рисунок 3.2 – Деформация растяжения конечного элемента 327014 в зависимости от времени

В данном случае для индикации фактических условий трения достаточно только наличие данных по величине деформаций в конкретном выбранном участке заготовки.

Для разработки методики адаптации управляющей программы нагружения заготовки необходимо выбрать один из двух способов индикации условий трения, так как совместное использование предлагаемых способов является достаточно трудоемким. При индикации условий трения через усилия необходимо крепить

тензодатчик в изгибаемой выпуклой поверхности заготовки, что повлияет на точность измерений. При индикации условий трения через измерение деформаций, экстензометр крепится в зоне, находящейся у цанговых зажимов, не имеющей выпуклости. Такое крепление датчика на прямолинейном участке заготовки позволяет измерять деформацию растяжения с точностью, регламентируемой паспортом на экстензометр. Таким образом, предпочтительным для индикации условий трения является использование измерений деформаций заготовки.

Фактическую деформацию растяжения концов заготовки возможно измерить с помощью достаточно большого разнообразия измерительных приборов. Для измерения деформаций можно использовать наклеиваемые тензорезисторы. Тензорезистор состоит из решетки, выполненной из тонкой проволоки или металлической фольги, уложенной на изоляционную подложку, и подсоединенных выводов тензорезистора [64]. Деформация объекта измерения передается резистивной проволоке или резистивной фольге тензорезистора через его основание (подложку). В результате сопротивление проволоки или фольги изменяется. Основание тензорезистора приклеивается к зоне измерения деформаций. Зона деформации должна иметь прямолинейную поверхность, что исключает возможность размещения тензорезисторов в зонах заготовки, имеющих выпуклую поверхность. Прямолинейной поверхностью у заготовки при гибке с растяжением обладает зона заготовки расположенная у зажимов. Протяженность такой зоны примерно равна расстоянию от схода формообразующей оправки до зажима пресса.

На данном этапе развития науки и техники, деформацию растяжения, с выходными данными, передающимися на компьютер, возможно измерять с помощью специальных приборов – экстензометров [65].

Имеются данные по контролю фактической деформации заготовки в процессах гибки с растяжением, описанные в монографии [22]. Для контроля деформаций здесь применяется датчик, работающий по принципу контактных экстензометров, применяемых для измерения деформаций при испытаниях на

растяжение. Предлагается закреплять датчики на концы заготовки ближе к зажимам. Данная зона заготовки практически не изгибается, что позволит измерять деформацию растяжения на прямолинейном участке с необходимой точностью.

Различают бесконтактные и контактные экстензометры. Контактные экстензометры широко представлены на отечественном рынке. Среди них для измерения деформаций растяжения выделяют навесные, длинноходовые, автоматические.

Навесные экстензометры применяются в областях, требующих большой точности измерений, которая регламентируется стандартом ISO 9513:2012 [65]. Внешний вид навесного экстензометра представлен на рисунке 3.3.

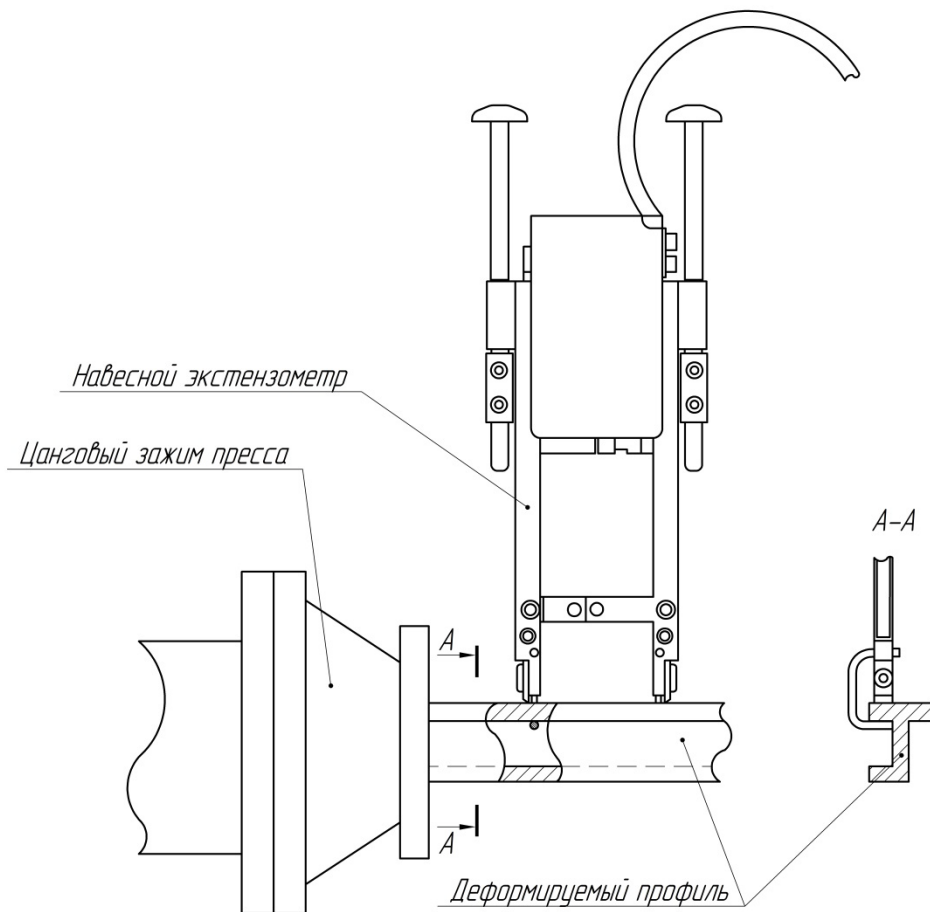


Рисунок 3.3 – Схема измерения деформаций удлинения на заготовке экстензометром

Принцип работы с навесными экстензометрами следующий: экстензометры закрепляются на детали, на которой измеряются деформации, и поддерживаются ей. В процессе деформации детали «губки» экстензометра раздвигаются и удлиняют тензодатчик, в котором изменяется электрическое сопротивление. Изменение электрического сопротивления пропорционально деформации.

Автоматические и длинноходовые экстензометры движутся по собственным направляющим и поэтому не могут быть применены на изгибаемом профиле и больше подходят для испытаний на растяжение, и, как правило, применяются для увеличения точности измерений в процессе испытаний, получаемая благодаря исключению фактора неточности установки.

Для бесконтактных измерений применяют видеоэкстензометры. Такие экстензометры используются при испытаниях заготовок из материалов, на разрушение которых влияет контакт с навесными экстензометрами.

Сущность измерения деформаций видеоэкстензометрами в использовании метода цифровой корреляции изображений (DIC). Для осуществления измерений, на поверхности, на которой отслеживаются деформации, должен быть нанесен специальный спекл-рисунок. Спекл-рисунок представляет собой контрастные метки-пятна, нанесенные на однородном фоне. Относительное смещение меток-пятен позволяет получить величины деформаций заготовки практически по всей длине профиля.

Видимыми при гибке с растяжением является верхний и боковой торцы заготовки. Верхний торец заготовки, на стадии изгиба, отдаляется от видеокамеры, тем самым делая измерение деформаций растяжения недостаточно точным, при статичном положении прибора для бесконтактных измерений, заложенном условиями его эксплуатации. Таким образом, точное измерение деформаций видеоэкстензометрами возможно только на боковом торце профиля.

Для нанесения спекл-рисунка на каждый профиль, должна быть выделена специальная зона, оборудованная вытяжной вентиляцией и персоналом, имеющим квалификацию для проведения малярных работ. Процесс нанесения спекл-рисунка и сушки спекл рисунка на каждый профиль достаточно

трудоемкий. Ориентировочно нанесение спекл-рисунка, и его полимеризация, с использованием сушильных установок (например, инфракрасных ламп), в наилучшем случае добавляет к трудоемкости изготовления одной детали 10 минут. В случае термически-обрабатываемых после гибки с растяжением профилей необходимо удаление спекл-рисунка, что добавляет к трудоемкости изготовления одной детали ориентировочно ещё 20 минут [70]. Такое значительное увеличение трудоемкости изготовления при серийном производстве самолетов недопустимо, поэтому на данном этапе развития науки и техники применение бесконтактных видеоэкстензометров целесообразно только на опытных, первых образцах профилей.

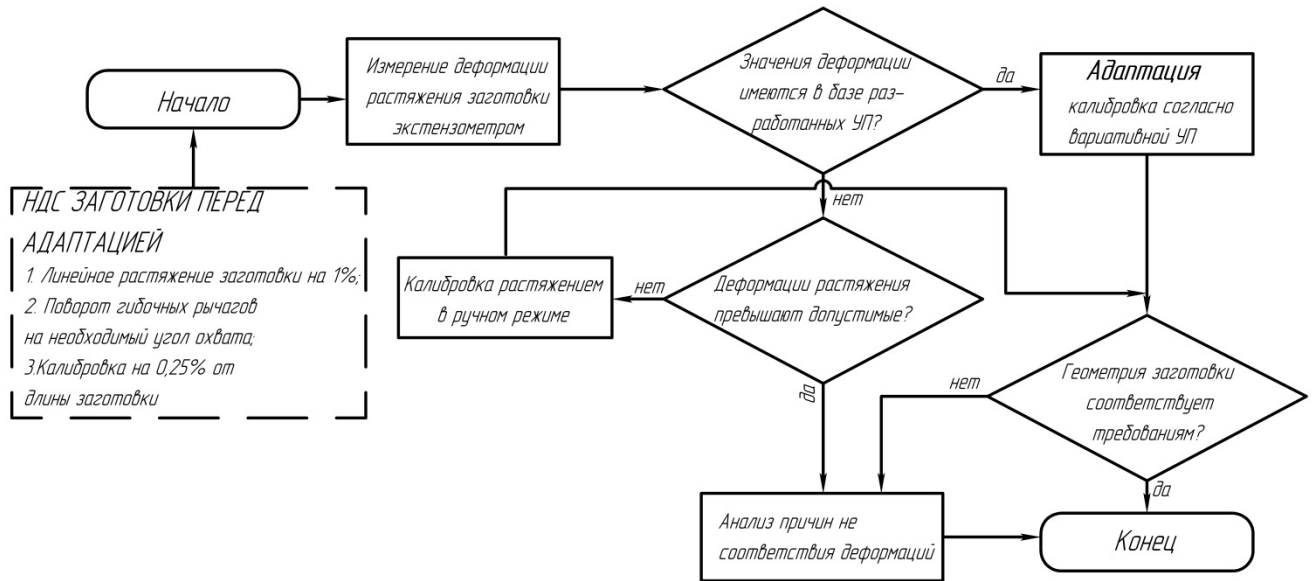
Соответственно, наиболее предпочтительным из рассмотренных вариантов является применение навесных экстензометров, закрепляемых в зоне профильной заготовки, находящейся у цанговых зажимов прессы. Зона крепления обусловлена доступностью для крепления навесных экстензометров, а также тем, что данная зона в зависимости от величины коэффициента трения деформируется с различной интенсивностью.

3.2. Методика адаптации управляющей программы нагружения заготовки в ходе гибки с растяжением

По результатам теоретического анализа процесса гибки с растяжением и выбора измеряемой величины, являющейся индикатором условий трения, разработана методика адаптации управляющей программы нагружения заготовки в ходе гибки с растяжением. 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 имеется две части управляющей программы, первая 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 (рисунок 3.2). В случае если измерять деформацию растяжения на концах заготовки (сразу непосредственно после изгиба), разница деформаций на концах заготовки в зависимости от коэффициентов трения незначительна и составляет около 0,5%, что сложно измерить датчиками деформаций. Это обусловлено тем, что при изгибе, заготовка активно растягивается только в тех зонах, где происходит огибание ею формообразующей оправки. Во второй части, вариативной части управляющей программы, содержатся кадры дальнейшей калибровки растяжением. Обе части управляющей программы построены на основе конечно-элементного анализа процесса гибки с растяжением в программе Ls-Dyna.

Алгоритм адаптации начинается с момента закрепления заготовки в зажимы (рисунок 3.4). На первом этапе, заготовка растягивается зажимами. Повышая усилия на гидроцилиндрах растяжения, шток с установленным зажимом, втягивается, растягивая заготовку до $1 \pm 0,05$ %. По достижению требуемой степени деформации, производится поворот гибочных рычагов на необходимый угол поворота, вплоть до достижения заготовкой полного угла охвата формообразующей оправки. Затем производится калибровочное растяжение на величину, составляющую 0,5% от длины исходной заготовки. На третьем этапе производится снятие показаний величины деформации с экстензометра. Затем производится сравнение полученных деформаций заготовки с деформациями, имеющимися в массиве вариативных частей управляющей программы деформирования. В случае если имеется управляющая программа с аналогичными деформациями, производится адаптация процесса калибровки.



База разработанных УП

Порядковый № программы	Деформация	Коэффициент трения	Требуемое дополнительное перемещение X_L , X_R
1	0,022	0,10	0
2	0,023	0,11	2
3	0,024	0,12	3,5
4	0,025	0,13	6,5
5	0,026	0,14	13,5

Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма адаптации управляющей программы гибки с растяжением

В ином случае, если деформация растяжения заготовки не превышает допустимые, производится калибровка растяжением в ручном режиме с дальнейшим анализом несоответствия конечно-элементной модели реальному процессу гибки, используя известные методики с построениями причинно-следственных диаграмм и диаграмм Исикава [66]. Затем, в случае если первопричиной является некорректно составленная конечно-элементная модель, необходимо произвести подбор её параметров так, чтобы деформации в модели соответствовали снятым с экстензометра.

После корректировки конечно-элементной модели необходимо осуществить повторное деформирование партии деталей и в случае, если адаптация производится корректно на пяти и более заготовках, то необходимо продолжить формообразование партии деталей с адаптацией управляющей программы нагружения.

3.3. Система адаптивного управления процессом гибки с растяжением

Для реализации описанной методики, разработана система адаптивного управления процессом гибки с растяжением профилей. Блок-схема адаптивной системы управления показана на рисунке 3.5.

Система построена по модульному принципу и состоит из следующих основных компонентов:

- промышленный компьютер;
- программируемый логический контроллер, связанный с исполнительными механизмами гибочно-растяжного прессы;
- датчики измерения деформаций, закрепляемые на концах заготовки.

В промышленном компьютере имеется управляющая программа, состоящая из базовой (неизменяемой) и вариативной частей. Обе части управляющей программы построены на основе конечно-элементного анализа процесса гибки с растяжением.

Базовая часть управляющей программы деформирования содержит кадры предварительного растяжения и изгиба заготовки на необходимый угол охвата с последующим незначительным калибровочным растяжением, обеспечиваемым перемещением штоков гидроцилиндров растяжения на величину, составляющую 0,25% от длины исходной заготовки. Вариативная часть управляющей программы деформирования содержит кадры калибровки растяжением, необходимой для минимизации явления пружинения. Данных частей управляющих программ подготавливается несколько вариантов для различных коэффициентов трения. В зависимости от степени растяжения, на этапе конечно-элементного анализа подбирается деформация калибровочного растяжения, при которой полученная геометрия детали удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям по точности.

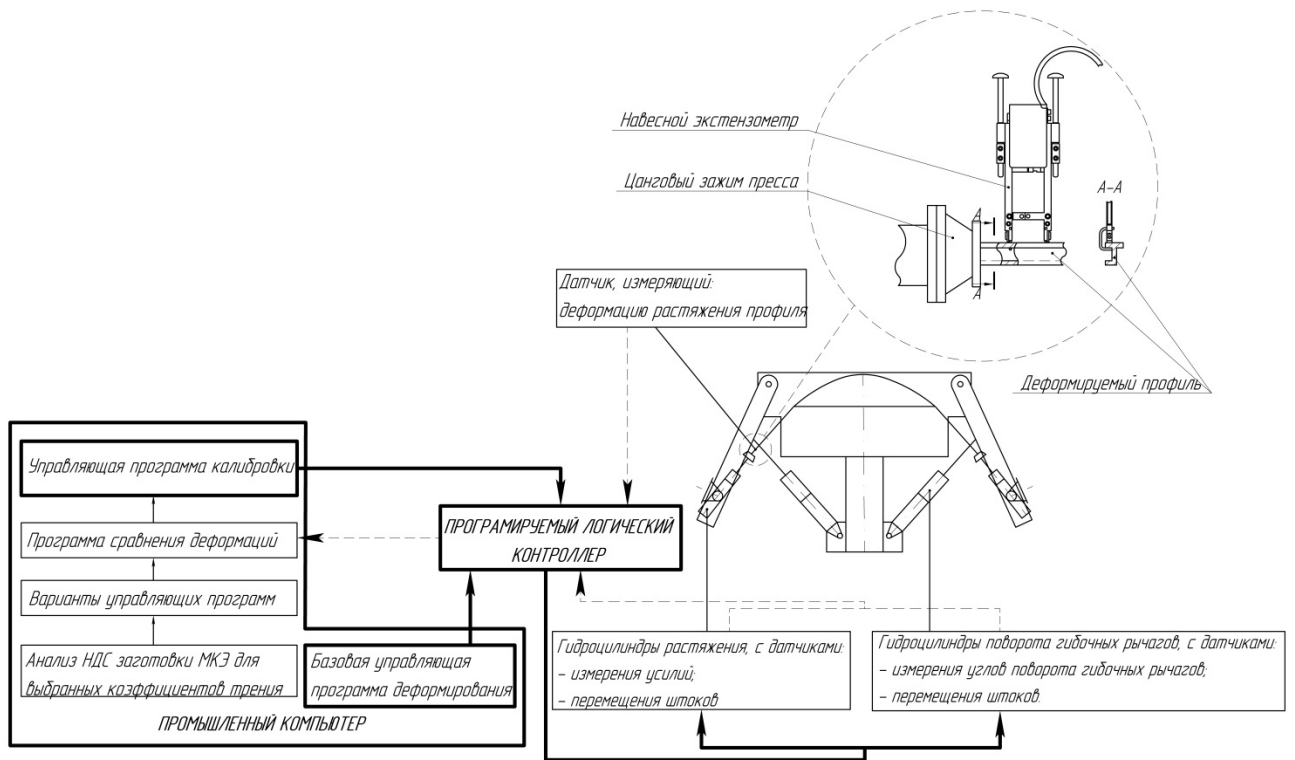


Рисунок 3.5 – Блок-схема системы адаптивного управления процессом гибки с растяжением для гибочно-растяжного прессы:

—————> – пути передачи команд на исполнительные механизмы прессы; <-----
 данные обратной связи; —> - пути преобразования данных в промышленном
 компьютере

Система адаптивного управления работает следующим образом:

1. С промышленного компьютера на программируемый логический контроллер передается базовая часть управляющей программы деформирования.
2. По результатам деформирования по базовой части управляющей программы, экстензометром измеряется деформация заготовки и передается через программируемый логический контроллер на промышленный компьютер.
3. На промышленном компьютере производится сравнение тангенциальной деформации заготовки после незначительного калибровочного растяжения, полученной в результате работы базовой части управляющей программы, с расчетными деформациями, имеющимися в вариативных частях управляющей программы.
4. Вариативная часть управляющей программы деформирования с наиболее близкими значениями деформаций передается через программируемый

логический контроллер на растяжные гидроцилиндры гибочно-растяжного пресса.

На разработанную систему адаптивного управления получен патент на изобретение № 28082942 (приложение 2).

Для формирования и быстрой корректировки вариативных частей управляющей программы разработан модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением (рисунок 3.6). Листинг кода модуля находится в приложении 4.

Модуль имеет графический интерфейс и имеет следующий функционал:

1. Формирование данных об адаптации. Пользователь заносит данные о требуемом перемещении в зависимости от деформаций из конечно-элементных моделей. В программе реализован механизм сохранения и загрузки сформированных данных.

2. Получение величины текущей деформации с экстензометра.

3. Адаптация управляющей программы нагружения, производимая по результатам сравнения деформации с экстензометра и деформаций из конечно-элементной модели. Если деформация с экстензометра и деформация из конечно-элементной модели равны, в выбранный файл управляющей программы нагружения добавляется дополнительный кадр калибровки, с требуемыми параметрами перемещения.

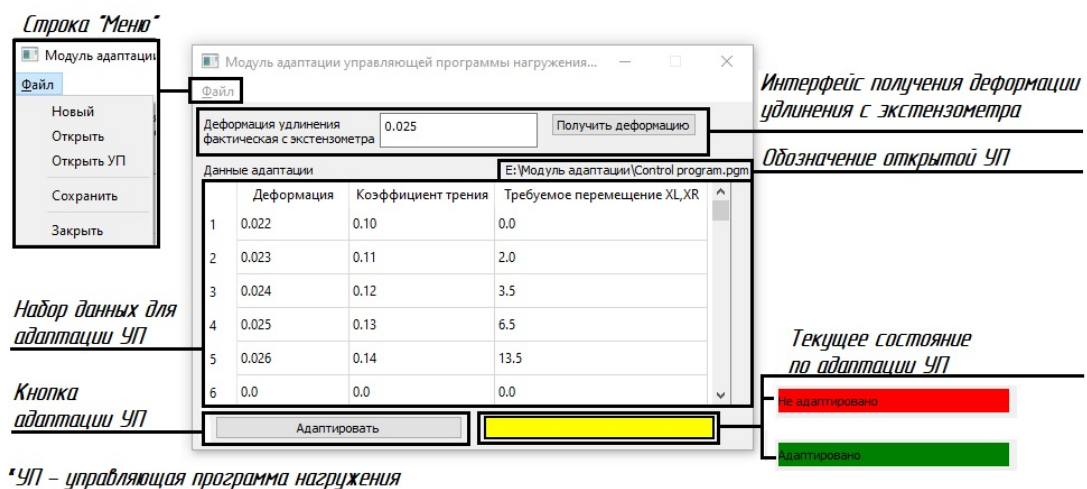


Рисунок 3.6 – Модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением

На разработанный модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023666945 (приложение 3).

3.4. Разработка адаптивной технологии гибки с растяжением

Ключевым этапом разработки технологии является установление технологичности формообразования детали гибкой с растяжением на имеющемся оборудовании. Прежде всего на технологичность в данном случае влияют кинематические и силовые ограничения гибочно-растяжных прессов.

Силовым ограничением гибочно-растяжного пресса является максимальное усилие «Р», на которое рассчитан растяжной гидроцилиндр. Основными кинематическими ограничениями гибочно-растяжных прессов являются (рисунок 3.7):

- расстояние между осями гибочных рычагов (данный параметр никак не регулируется и зависит от модели гибочно-растяжного пресса) «а»;
- диапазон углов поворота гибочного рычага «β»;
- расстояние, на которое может быть перемещена каретка (установочный параметр. Кареткой нельзя управлять в процессе деформирования заготовки, так как она перемещается по ходовому винту, не допускающему вращение под нагрузкой) «b»;
- допустимая величина перемещений штоков растяжных гидроцилиндров «δ».

Для изготовления высококачественных заготовок, необходимо провести тщательную технологическую проработку детали для оценки возможности изготовления гибкой с растяжением с применением адаптивного управления, (рисунок 3.8).

В случае, если формообразующая оправка не спроектирована необходимо при её разработке учитывать пружинение на оправке следующим путем:

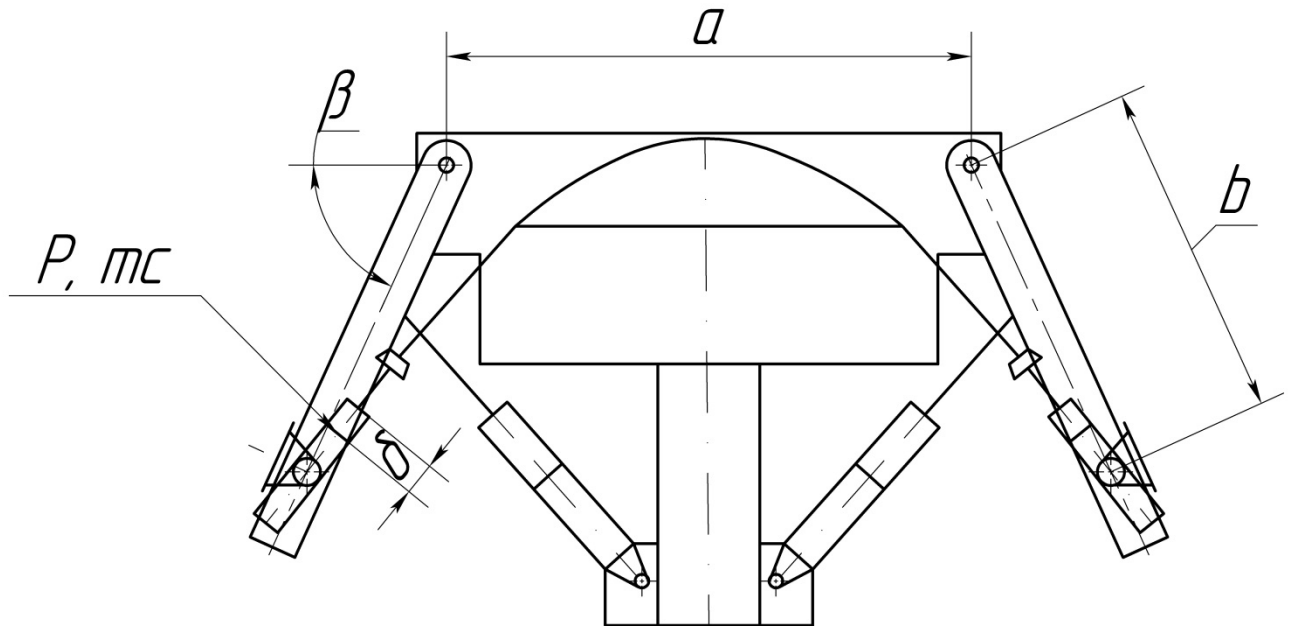


Рисунок 3.7 – Основные силовые и кинематические ограничения гибочно-растяжных прессов

1. Выполнить аналитический расчет координат перемещения концевых участков заготовки, согласно методике описанной в 2.2, используя разработанный модуль расчета траекторий деформирования заготовки, для моделирования гибки с растяжением заготовки по оправке, выполненной по внутреннему контуру готовой детали. Произвести конечно-элементное моделирование формообразования заготовки с калибровочным растяжением, обеспечиваемым перемещением штоков гидроцилиндров растяжения на величину, составляющую 1% от длины исходной заготовки. Выполнить моделирование пружинения заготовки, деформированной по расчетной траектории.

Коэффициент трения в конечно-элементной модели должен быть установлен в соответствии со справочными или экспериментальными данными по используемым в процессе формообразования антифрикционным материалам. Такой коэффициент трения принимается за **номинальный**. В случае, если при аналитическом расчете смещение штока растяжного гидроцилиндра превышает допустимое, деталь невозможно изготовить на имеющемся оборудовании в 1 переход и проводить конечно-элементное моделирование процесса не имеет смысла. Также возможно определить пружинение на формообразующей оправке

без конечно-элементного моделирования, рассчитав остаточную кривизну детали после разгрузки, используя расчетную зависимость [19]:

$$\tilde{x}_0 = x_0 - \frac{M}{EJ - My_0}, \quad (3.2)$$

где x_0 – необходимая кривизна детали; M – изгибающий момент; E – модуль упругости материала заготовки; y_0 – смещение оси поворота сечения относительно центра тяжести сечения; J – осевой момент инерции поперечного сечения.

2. На величину отклонения заготовки от рабочего контура формообразующей оправки, выполненной по внутреннему контуру детали (пружинения), необходимо скорректировать рабочую поверхность проектируемой формообразующей оправки.

Для оценки технологичности формообразования заготовки по спроектированной оправке необходимо выполнить аналитический расчет согласно методике описанной в разделе 2.2, используя разработанный модуль расчета траекторий, выполненный в CAD системе T-flex. По результатам расчета необходимо оценить полученное смещение штока « δ » растяжного гидроцилиндра при требуемом угле поворота гибочного рычага « β ». В случае, если смещение штока δ растяжного гидроцилиндра превышает предельное, использование системы адаптивного управления невозможно по причине того, что заготовку возможно изготовить только в два перехода. Вследствие того, что не допускается вращения винта под нагрузкой, которое необходимо для перемещения каретки гибочно-растяжного пресса, перед вторым переходом необходимо переустановить заготовку, сбрасывая усилия на растяжных гидроцилиндрах. При переустановке, заготовка претерпит упругую разгрузку и оператору необходимо будет вручную перезакрепить заготовку, оказывая на неё силовое воздействие, которое невозможно учесть в программе конечно-элементного моделирования.

Если заготовка технологична, модель заготовки, рабочий контур формообразующей оправки, скорректированный с учетом пружинения, и траектории движения гибочных рычагов переносят в программу конечно-элементного анализа Ls-Dyna. В программе производят пробное моделирование с коэффициентом трения, под который рассчитана формообразующая оправка. При этом заготовку первоначально калибруют до достижения предельной деформации, указанной на кривой упрочнения.

Кадры конечно-элементной модели с калибровкой экспортируют в модель для определения пружинения. Кадр конечно-элементной модели, на котором заготовка имеет допустимое пружинение, при минимальном значении деформаций растяжения, содержит необходимые параметры перемещения штоков растяжных гидроцилиндров пресса на этапе калибровки. Такие параметры перемещения рабочих органов пресса принимаются годными к использованию в управляющей программе нагружения. Затем необходимо, для коэффициентов трения, отклоняющихся от номинального на принятый шаг, аналогичным образом определить требуемые параметры перемещения рабочих органов пресса. Шаг отклонения коэффициента трения от номинала принимать в диапазоне от 0,001 до 0,01.

Далее необходимо сформировать управляющие программы деформирования, написанные на языке программирования, которые использует система ЧПУ конкретного гибочно-растяжного пресса (наиболее часто используется язык программирования G-code).

Базовая управляющая программа деформирования должна включать этапы предварительного растяжения на величину, составляющую 1 % от длины исходной заготовки, изгиба до оборачивания заготовкой формообразующей оправки на полный угол охвата, а также калибровки растяжением на величину, составляющую 0,5% от длины исходной заготовки. Величины поворота гибочных рычагов, предварительные и калибровочные смещения растяжных гидроцилиндров, положения кареток взять из результатов расчета траекторий движения заготовок, полученных в модуле расчета траекторий.

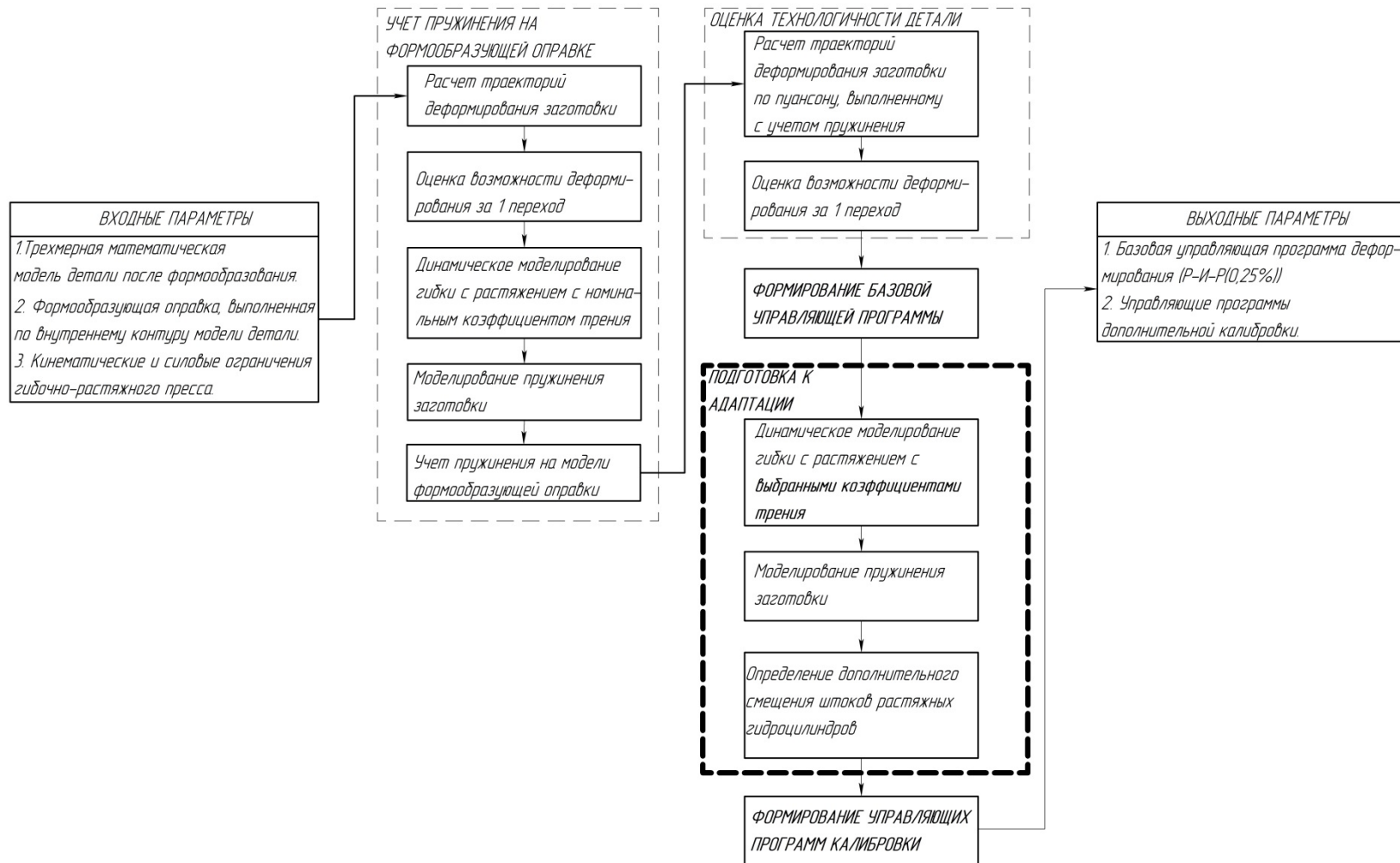


Рисунок 3.8 – Технологическая проработка детали для оценки возможности изготовления гибкой с растяжением с применением адаптивного управления

Для каждого из выбранных коэффициентов трения, необходимо подготовить вариативные управляющие программы деформирования, которые содержат кадры смещения штоков растяжных гидроцилиндров на величину необходимую для получения требуемой формы детали после разгрузки. У каждой из вариативных частей управляющей программ деформирования должна быть отметка о деформации заготовки (в измеряемой зоне, где устанавливается экстензометр) перед началом выполнения вариативной управляющей программы.

Затем осуществляется **настройка гибочно-растяжного пресса** под изготовление партии деталей. Оператору перед гибкой партией деталей необходимо загрузить базовую управляющую программу деформирования в компьютер, управляющий системой ЧПУ. В соответствии с базовой управляющей программой деформирования произвести настройку начального положения гибочных рычагов и кареток гибочно-растяжного пресса. На данном этапе завершается подготовка к изготовлению деталей гибкой с растяжением с применением адаптивного управления (рисунок 3.9).

Процесс изготовления партии деталей гибкой с растяжением начинается с **закрепления очередной заготовки в цанговые зажимы пресса**. Затем на заготовку необходимо установить навесной экстензометр в зоне, находящейся у цанговых зажимов пресса. На компьютере, подключенном к навесному экстензометру, необходимо запустить программу для отслеживания деформаций.

Далее необходимо произвести **формообразование заготовки**. Запустить базовую управляющую программу деформирования. После выполнения формообразования по базовой управляющей программе, используя модуль адаптации управляющей программы нагружения, произвести сравнение деформаций, полученных с навесного экстензометра с начальными деформациями из вариативной управляющей программы деформирования заготовки. По результатам сравнения, запустить вариативную управляющую программу деформирования и произвести калибровку.

На заключительном этапе, необходимо **произвести контроль полученной геометрии партии деталей**. Внешний и внутренний контуры детали проверить

путем сравнения с контрольным шаблоном. В выбранных поперечных сечениях полученной детали необходимо измерить линейные и угловые размеры. Стоит отметить, что при первоначальной отладке процесса формообразования, контроль геометрии проводить после каждого цикла формообразования. После отладки процесса формообразования, с обеспечением стабильных формы и размеров деталей, контролировать каждую 5 заготовку.

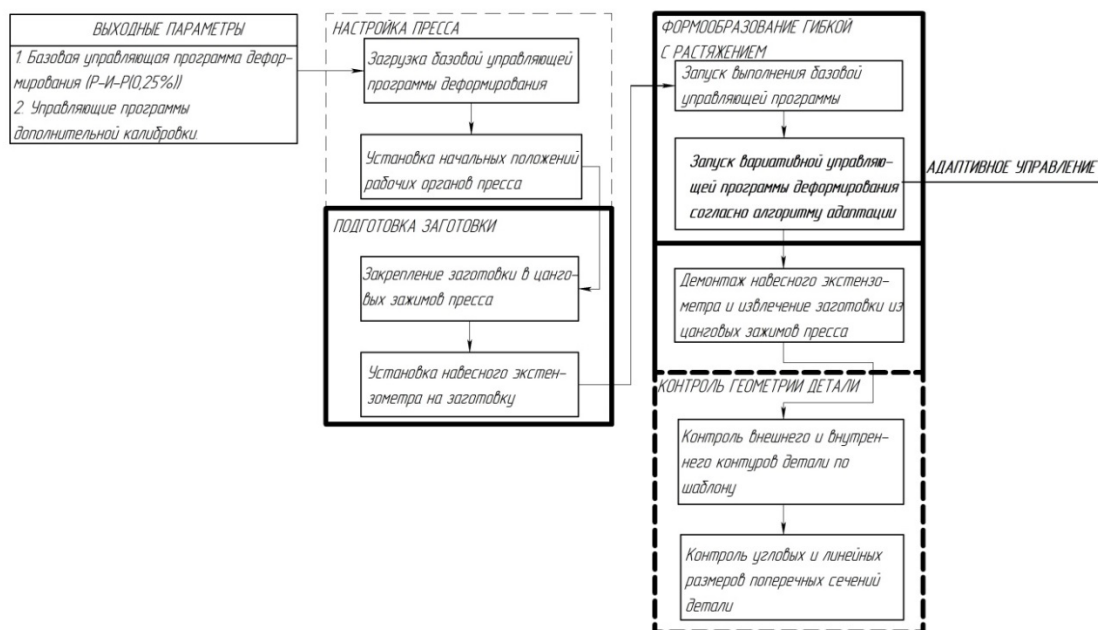


Рисунок 3.9 – Блок-схема разработанной серийной технологии гибки с растяжением:

- — — — операции подготовки пресса к формообразованию партии деталей;
- — — — технологические операции изготовления очередной детали из партии;
- — — — контрольные операции для партии изготовленных деталей.

3.5. Выводы по главе

1. Определена измеряемая величина, являющаяся индикатором условий трения и предложен способ её измерения.
2. Разработана методика адаптации управляющей программы нагружения заготовки в ходе формообразования гибкой с растяжением.
3. Разработана и запатентована система адаптивного управления процессом гибки с растяжением.
4. Разработан модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением
5. Разработана адаптивная технология гибки с растяжением.

ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ АДАПТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ

4.1. Условия апробации технологии

Проведена апробация разработанной технологии формообразования прессованного полуфабриката из алюминиевого сплава В95очМ на авиастроительном предприятии (Филиал ПАО «Ил» - Авиастар). Технология апробировалась на 16 заготовках сегментов шпангоута из прессованного профиля Z-таврового сечения, из которых 8 штук (№1-№8) имеют несимметричное продольное сечение ($L_{заг} = 4700$ мм), с переменным радиусом кривизны, а также 8 штук (№9-№16) имеют симметричное продольное сечение с постоянным радиусом кривизны ($L_{заг} = 4000$ мм) (рисунок 4.1).

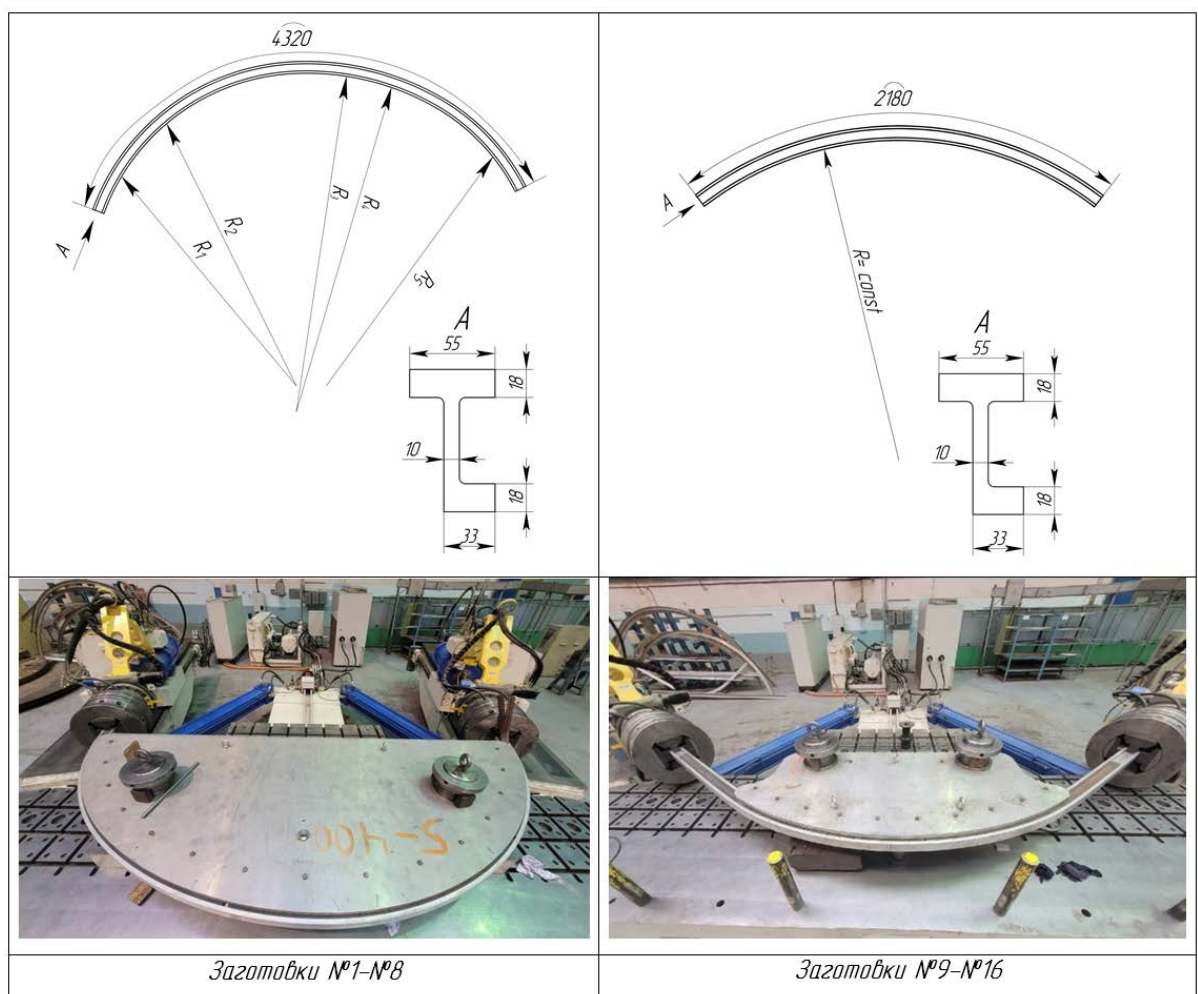


Рисунок 4.1 – Эскизы заготовок сегментов шпангоута и внешний вид деформированных заготовок на прессе V-80

Технологический маршрут изготовления заготовок сегмента шпангоута состоял из следующих операций:

- входной контроль прессованного полуфабриката в отожженном состоянии;
- формообразование прессованного полуфабриката гибкой с растяжением с применением адаптации на этапе калибровки;
- контроль геометрии контура деформированной заготовки сегмента шпангоута;
- термическая обработка заготовки по режиму T2;
- контроль геометрии заготовки сегмента шпангоута и механических свойств на образцах.

4.2. Результаты апробации технологии

Перед формообразованием прессованного полуфабриката из алюминиевого сплава марки В95очМ проводили следующие технологические операции:

- установка на стол пресса V-80 гибочного пуансона;
- установка цанговых зажимов для захвата заготовки;
- закрепление технологических концов прессованного полуфабриката в специальные захваты – цанговые зажимы; после установки в зажимы, заготовка должна оставаться в прямолинейном состоянии без потери устойчивости;
- разметка наружного контура делительной сеткой для оценки деформаций (шаг делительной сетки составлял 120 мм) (рисунок 4.2);
- установка полиуретановой вставки в профиль;
- настройка начальных параметров пресса: установка начальных положений кареток и первоначального угла, на котором находятся гибочные рычаги, а также загрузка базовой управляющей программы деформирования заготовки в систему управления гибочно-растяжным прессом.

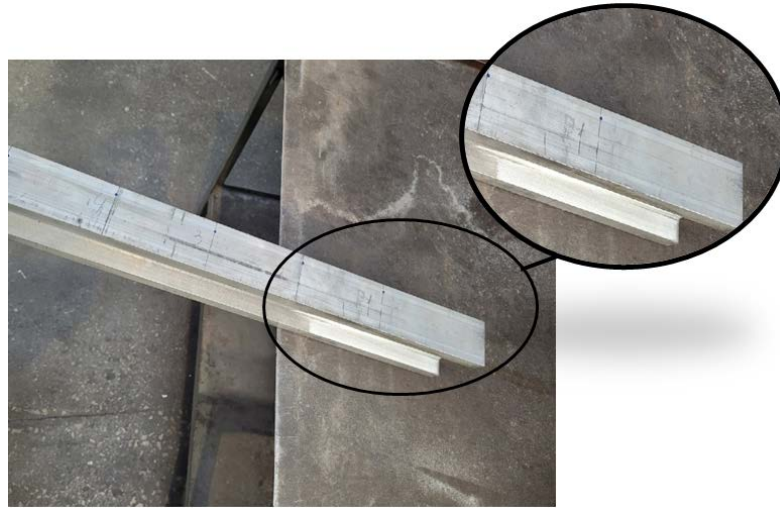


Рисунок 4.2 – Разметка профиля для измерения деформаций для выполнения адаптивной калибровки

Проведено предварительное конечно-элементное моделирование формообразования заготовок сегментов шпангоута в программе Ls-Dyna, в ходе которого была определена требуемая величина смещения штоков растяжных гидроцилиндров для различных коэффициентов трения (рисунок 4.3).

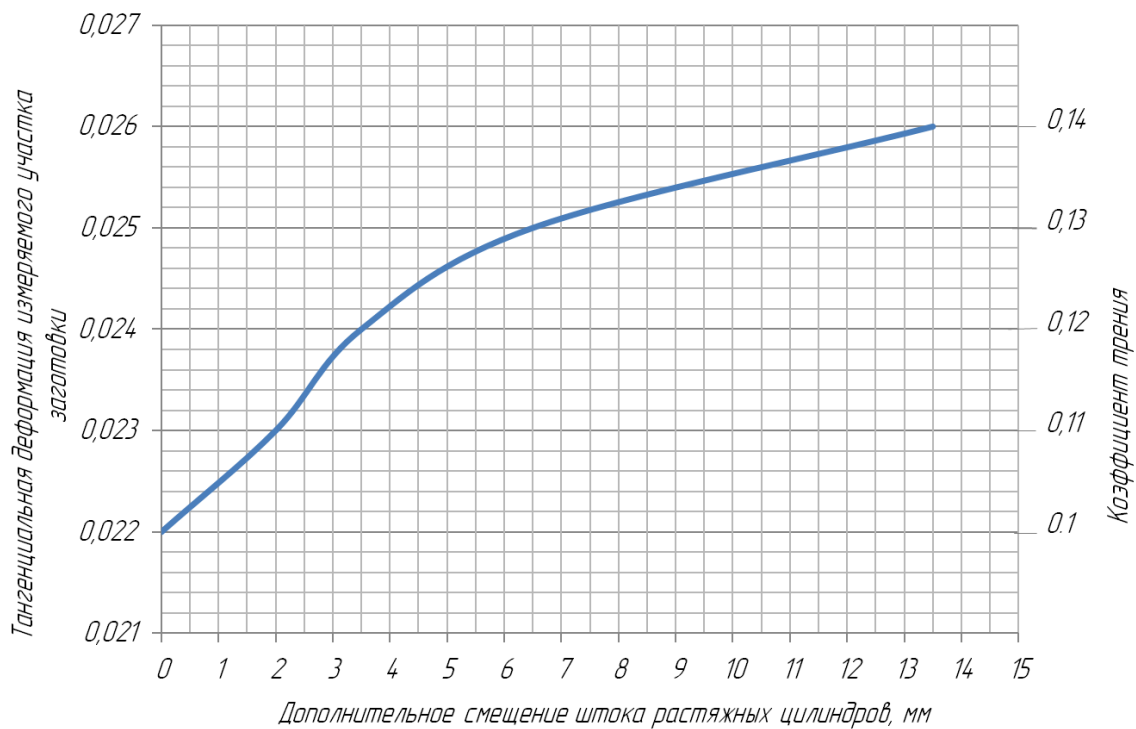


Рисунок 4.3 – График определения дополнительного смещения штоков растяжных гидроцилиндров при различных коэффициентах трения и тангенциальных деформациях заготовки длиной 4700 мм в контролируемой зоне на этапе калибровки

В ходе моделирования формообразования заготовки длиной 4000 мм было выявлено, что заготовка проявляет чувствительность к изменению коэффициента трения в диапазоне от 0,1...0,25 (рисунок 4.4).

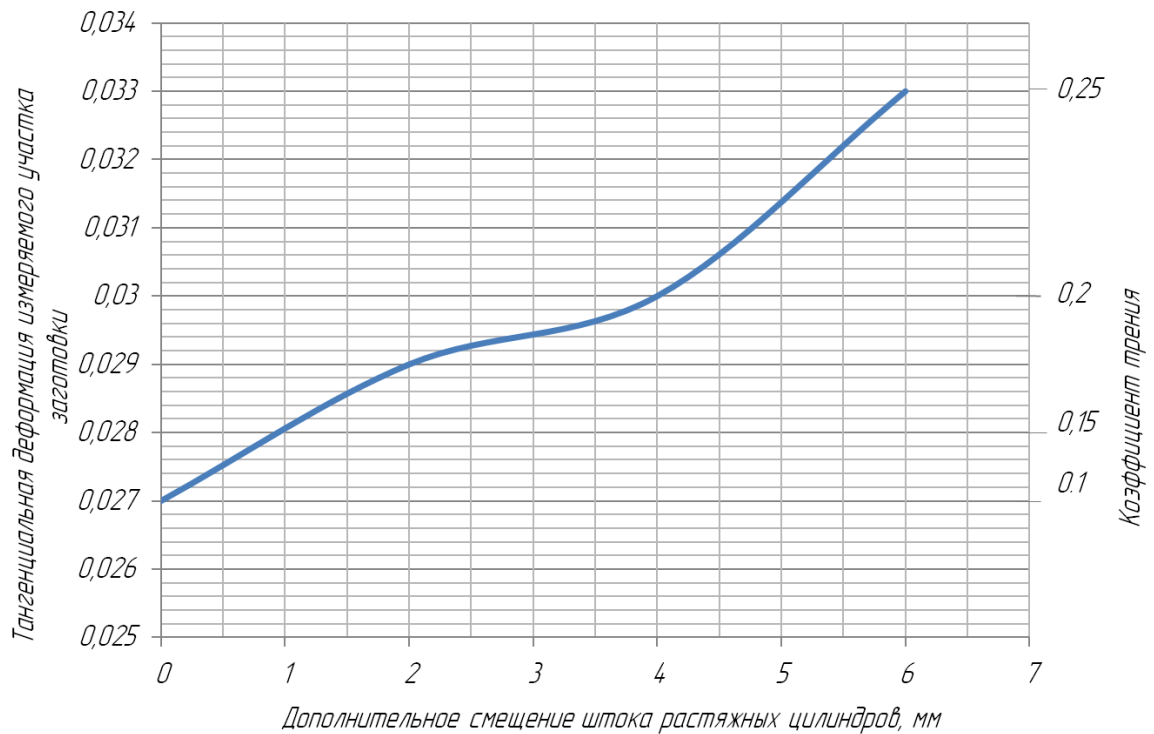


Рисунок 4.4 – График определения дополнительного смещения штоков растяжных гидроцилиндров при различных коэффициентах трения и тангенциальных деформациях заготовки длиной 4000 мм в контролируемой зоне на этапе калибровки

При формообразовании прессованного полуфабриката (профиль) применялась схема деформирования – растяжение с последующим изгибом и дальнейшим растяжением (Р-И-Р). Заготовки поступали в отожженном состоянии. Формообразование профилей проводили без дополнительного нагрева и при комнатной температуре.

Процесс формообразования профилей осуществлялся по базовой управляющей программе деформирования, содержащей кадры предварительного растяжения на 1%, изгиба и калибровки заготовки на величину, составляющую 0,5% от длины исходной заготовки. Контроль за выполнением управляющей программы осуществлялся со стойки ЧПУ

(рисунок 4.5). После выполнения кадров базовой управляющей программы, производилась адаптация процесса формообразования путем управления смещением растяжных гидроцилиндров по координатам XL и XR пресса.

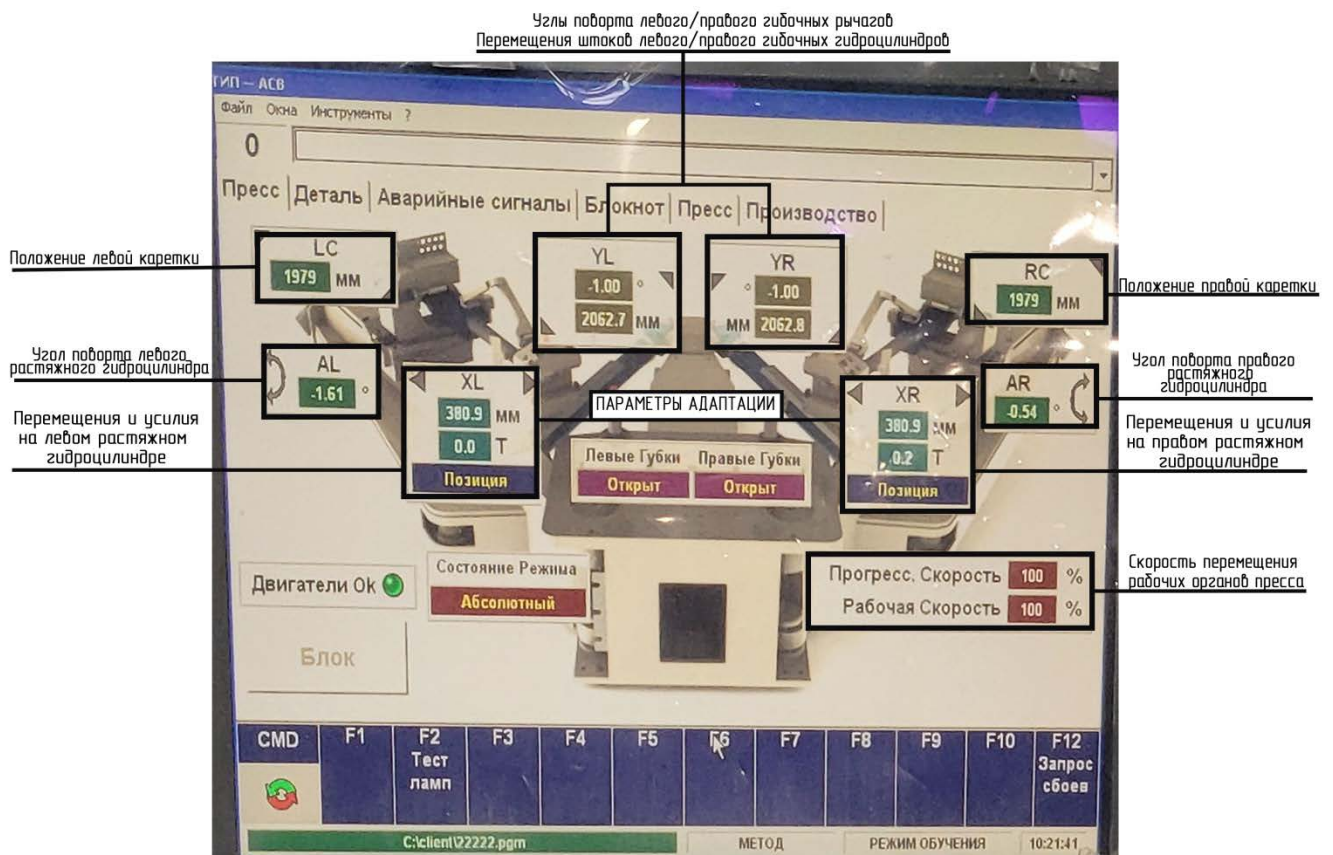


Рисунок 4.5 – Фотография экрана стойки ЧПУ гибочно-растяжного пресса V-80

Выбор величины смещения осуществлялся по графикам (рисунки 4.3, 4.4) на этапе калибровки в зависимости от измерений деформаций на концах заготовки. Данные по дополнительным смещениям штока растяжных гидроцилиндров на изготавливаемых профилях в зависимости от фактических деформаций приведены в таблице 4.1.

Для сравнения результатов применения адаптивной технологии гибки с растяжением, было проведено формообразование 3 заготовок сегментов шпангоута каждого типоразмера путем растяжения на 1%, изгиба, и калибровки путем дополнительного растяжения на 1% от длины исходной заготовки без применения адаптации.

Таблица 4.1 – Фактические данные по адаптации процесса деформирования на этапе калибровки под условия трения профилей

№ заготовки	Тангенциальная деформация измеряемого элемента реальной заготовки на этапе адаптации	Произведенное дополнительное смещение штока растяжных гидроцилиндров необходимое для устранения пружинения, мм
Профили длиной 4700 мм		
1	0,023	2
2	0,023	2
3	0,022	0
4	0,024	3,5
5	0,021	1
6	0,022	0
7	0,025	6,5
8	0,028	2
Профили длиной 4000 мм		
9	0,033	6
10	0,030	4
11	0,028	1
12	0,027	0
13	0,028	1
14	0,027	0
15	0,030	4
16	0,028	1

На заключительном этапе проводился контроль контура заготовки сегмента шпангоута и ее плоскостности с помощью контрольных шаблонов (рисунок 4.6). Измерения проводились по контрольным меткам, оставленным

на шаблонах. Результаты измерений при контроле геометрии формообразованных заготовок сегментов шпангоута из профиля сплава В95оч представлены в таблицах 4.2, 4.3.

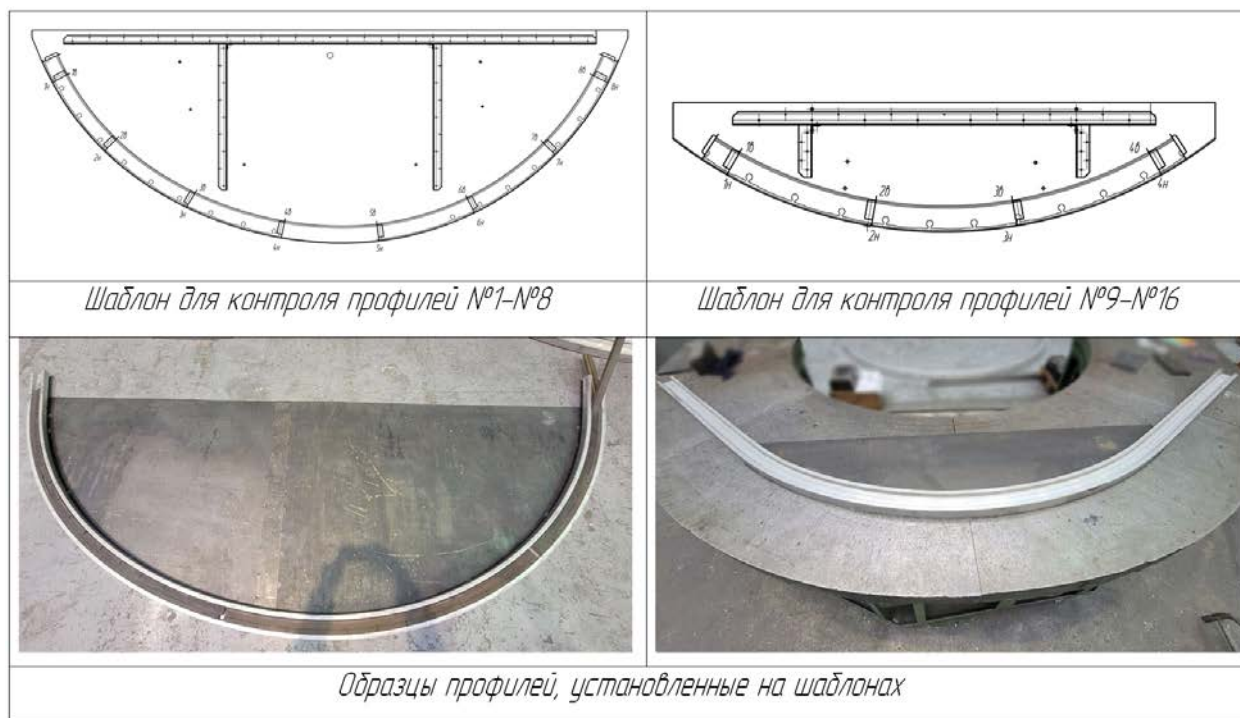


Рисунок 4.6 – Шаблоны с контрольными метками для измерения отклонений размеров формообразованных шпангоутов

Проведены измерения поперечных сечений полученных заготовок сегментов шпангоута (таблица 4.4). По результатам всех измерений геометрия сегментов шпангоута удовлетворительная. В ходе формообразования образовалась малка, максимальная величина которой составляет 1° . Также в ходе формообразования произошло утонение профиля по ширине, что показано в уменьшении значений размеров, обозначенных как «В» и «Е». Величина малки, а также утонения профиля незначительно снижают величину технологического припуска заготовки на механическую обработку. Максимальная величина, на которую снижен припуск на механическую обработку, составляет 1 мм.

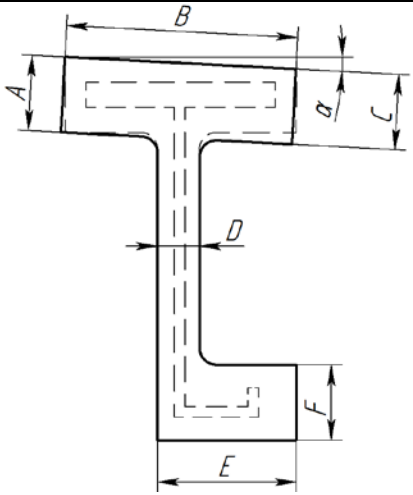
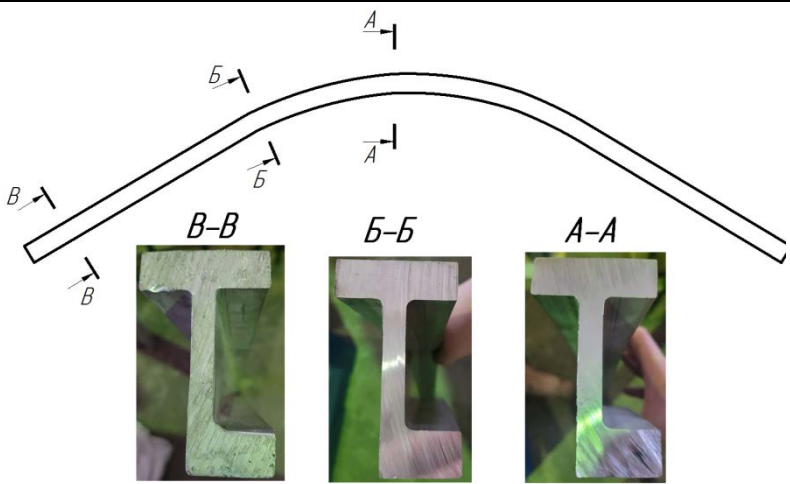
Таблица 4.2 – Отклонения изготовленных заготовок сегментов шпангоута №-1-№8 из прессованного профиля В95очМ с применением адаптации, мм

Точка замера	№ заготовки										
	Без адаптации			С применением адаптации							
1	1.1	1.2	1.3	1	2	3	4	5	6	7	8
1Н	- 7,2	- 0,9	+ 4,3	- 0,9	- 0,8	- 0,9	- 0,8	- 0,9	- 0,8	- 0,9	- 0,8
1В	- 6,3	- 0,9	+ 4,9	- 0,9	- 0,9	- 0,9	- 0,8	- 0,9	- 0,8	- 0,8	- 0,8
2Н	-5,5	-0,4	+3,7	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
2В	- 5,4	- 0,4	+ 3,8	- 0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,5	- 0,4	- 0,4	- 0,3
3Н	-4,3	-0,3	+2,1	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
3В	-4,3	-0,4	+2,2	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
4Н	-3,2	-0,4	+1,1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,6	-0,4	-0,4
4В	-3,4	-0,3	+1,5	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3
5Н	-3,2	-0,3	+1,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3
5В	-3,1	-0,3	+1,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3
6Н	-4,2	-0,3	+2,9	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2
6В	-4,5	-0,3	+ 2,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3
7Н	-5,9	-0,5	+3,1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,6	-0,5	-0,5
7В	-5,7	-0,4	+ 3,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4
8Н	-6,8	-0,8	+ 4,7	-0,8	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
8В	-7,5	-0,8	+ 4,2	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,8	-0,9	-0,9	-0,8

Таблица 4.3 – Отклонения изготовленных заготовок сегментов шпангоута №-9-№16 из прессованного профиля В95очМ с применением адаптации, мм

Точка замера	№ заготовки										
	Без адаптации			С применением адаптации							
1	9.1	9.2	9.3	9	10	11	12	13	14	15	16
1Н	+ 0,8	+ 2,1	+ 2,2	+ 0,6	+ 0,4	+ 0,5	+ 0,6	+ 0,3	+ 0,5	+ 0,4	+ 0,6
1В	+ 0,8	+ 2,0	+ 2,3	+ 0,6	+ 0,4	+ 0,5	+ 0,6	+ 0,4	+ 0,5	+ 0,4	+ 0,5
2Н	+ 0,5	+ 1,4	+ 1,3	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2
2В	+ 0,5	+ 1,3	+ 1,5	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2
3Н	+ 0,5	+ 1,3	+ 1,3	+0,2	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2
3В	+ 0,5	+ 1,3	+ 1,5	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,2
4Н	+ 0,7	+ 2,1	+ 2,2	+0,6	+0,4	+0,5	+0,6	+0,3	+0,5	+0,3	+0,5
4В	+ 0,8	+ 2,1	+ 2,3	+0,5	+0,4	+0,4	+0,6	+0,4	+0,5	+0,3	+0,6

Таблица 4.4 – Карта измерений поперечных сечений полученных заготовок сегмента шпангоута

	A, мм	B, мм	C, мм	D, мм	E, мм	F, мм	α , °
Номинальные размеры	18	55	18	10	33	18	0
Исходная заготовка	18,3	55,4	18,3	10,15	33,4	18,3	0
А-А	17,8	54,5	18	9,9	33,2	18,2	1
Б-Б	18	54,5	18	9,95	33,2	18,3	0,5
В-В	18,1	55	18	10	33,3	18,3	0
Обозначение размеров на сечении	Положение сечений на заготовке						
							

После формообразования проведена термическая обработка полученных деформированных заготовок сегментов шпангоута. Для термической обработки заготовок использовалась печь ПАП-6. Перед закалкой профили заневолевали в специальном приспособлении для термофиксации. Приспособление состоит из рамы со смонтированными на ней зажимами, фиксирующими заготовки в заневоленном состоянии (рисунок 4.7). Закалка осуществлялась следующим образом: профили в заневоленном состоянии помещали в печь и выдерживали 25 минут при температуре 470 °С. После выдержки в печи профили охлаждали в воде.

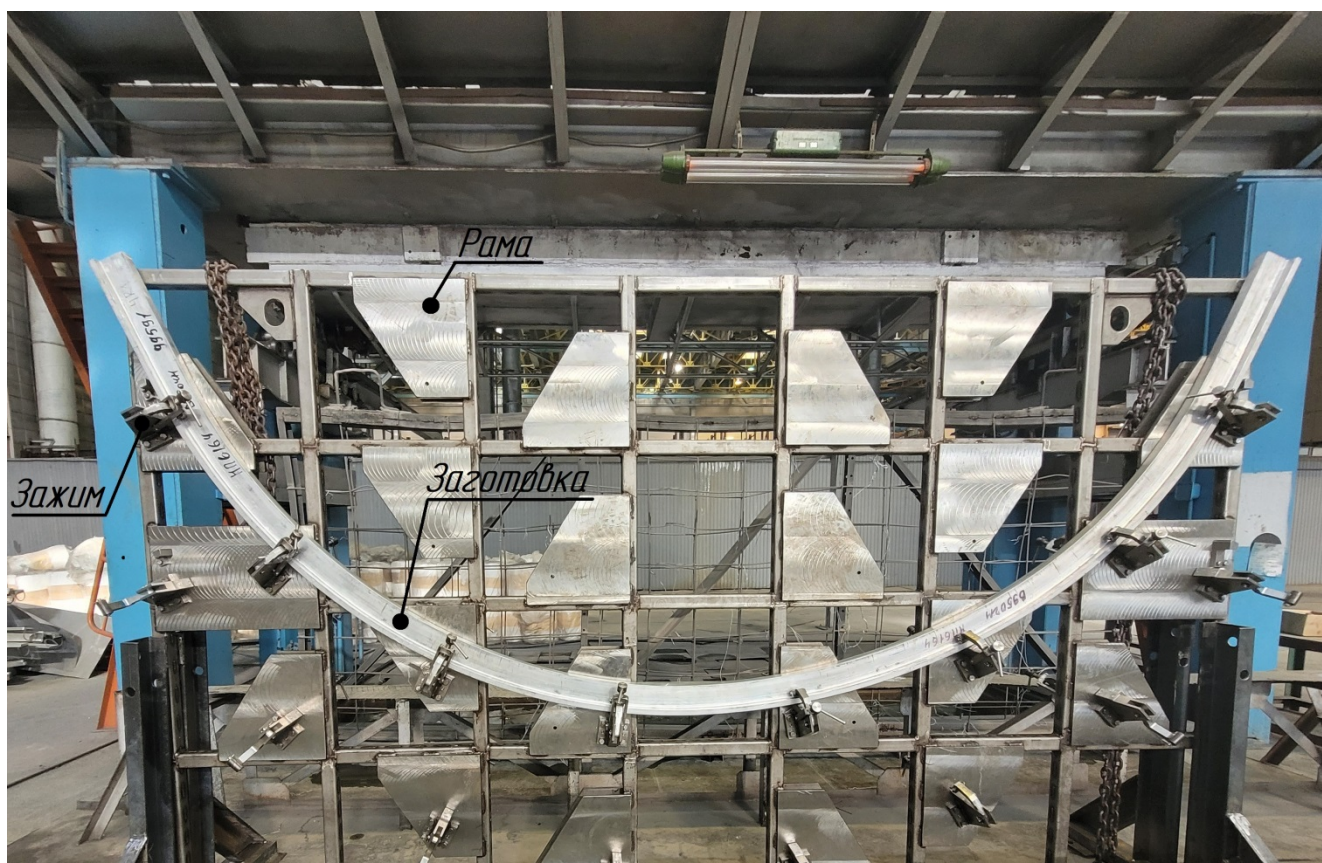


Рисунок 4.7 – Заготовка сегмента шпангоута, закрепленная в приспособлении для термофиксации.

Через два часа после закалки проводилось двухступенчатое старение заготовок по режиму T2. На первой ступени профили выдерживали при температуре 115 °С в течение 8 часов для режима. На второй ступени старения профили выдерживались при температуре 165 °С в течение 16 часов.

На разрывной машине одноосного растяжения Instron проведена оценка механических свойств заготовок сегментов шпангоутов. По результатам оценки получены следующие результаты: предел текучести $\sigma_{0,2} = 525...529$ МПа > [490 МПа]; предел прочности $\sigma_b = 575...579$ МПа > [550 МПа]; относительное удлинение $\delta = 12,8...15,6$ % > [6%]. В квадратных скобках приведены допустимые значения механических свойств прессованных профилей в режиме T2 согласно требованиям технических условий [67].

Полученные сегменты шпангоута после термической обработки представлены на рисунках 4.8, 4.9.



Рисунок 4.8 – Внешний вид изготовленных заготовок сегментов шпангоутов №1-№8 с применением адаптивного управления



Рисунок 4.9 – Внешний вид изготовленных заготовок сегментов шпангоутов №9-№16 с применением адаптивного управления

Таким образом, результаты апробации разработанной технологии свидетельствуют о том, что максимальный разброс пружинений для заготовки сегмента шпангоута при использовании адаптации на этапе калибровки заготовок снижается с величины 11,7 мм до величины 0,6 мм. По результатам апробации разработанной технологии получен акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии АО «Ульяновский НИИТ», занимающимся разработкой и внедрением в производство технологии и оборудования для изготовления профилей для авиационной промышленности.

4.3. Перспективы развития исследований адаптации управления процессом гибки с растяжением

На данном этапе развития науки и техники, технология гибки с растяжением достаточно широко используется в авиастроении. Изготовление деталей, имеющих допуски на отклонение контура ± 1 мм, сложно осуществить без применения адаптации управляющей программы. Один и тот же режим формообразования, при работе с партией деталей, дает погрешности по пружинению около ± 10 мм. Применение адаптивных систем управления процессов позволяет снизить погрешности, однако на данный момент такие системы были апробированы только на одном из этапов деформирования. Крайне перспективной является разработка такой системы управления, которая будет в режиме реального времени корректировать весь процесс деформирования: от предварительного растяжения до окончательной калибровки. По мнению автора диссертации, для реализации такой системы необходимо следующее:

- система измерения деформаций по всей заготовке, с возможностью получения результатов в режиме реального времени;
- соотнести все возможные случаи деформированного состояния в ходе формообразования гибкой с растяжением;
- на основе анализа процесса формообразования определить пути управления деформированным состоянием и последствия от управляющих воздействий;
- разработать алгоритм принятия решений об управляющих воздействиях в зависимости от распределения и величин деформаций на всем протяжении процесса деформирования, базирующийся на основе сравнения результатов моделирования и состояния заготовки в процессе формообразования с использованием принципа обратной связи;
- разработать управляющую программу, реализующую описанный алгоритм и внедрить её в существующее оборудование гибочно-растяжных прессов.

Таким образом, разработка системы адаптивного управления, реализуемой в режиме реального времени на всех этапах деформирования, требует

колоссального объема междисциплинарных исследований, с привлечением ученых и инженеров из области авиастроения, обработки металлов давлением, материаловедения, приборостроения, автоматизации, системного анализа и обработки информации, искусственного интеллекта и машинного обучения.

Для решения проблемы, описанной в разделе 2.3.2, заключающейся в том, что в процессе формообразования при полном повороте гибочных рычагов (на 90°), штоки растяжных гидроцилиндров уходят внутрь гильзы, и не обеспечивают необходимой деформации растяжения и изгиба заготовки из-за конструктивных особенностей прессы V-80, необходимо уменьшить расстояния между осями вращения гибочных рычагов «а» (рисунок 3.7) с величины 3,8 до 3 и менее метров. Такое уменьшение расстояния позволит значительно расширить номенклатуру изготавливаемых деталей на гибочно-растяжном прессе V-80.

4.4. Выводы по главе

1. Произведена апробация разработанной адаптивной технологии гибки с растяжением. Разброс пружинений на детали «заготовка сегмента шпангоута» снижен с 11,7 мм до 0,6 мм.

2. По результатам успешной апробации адаптивной технологии гибки с растяжением произведено внедрение результатов диссертационной работы на АО «Ульяновский НИАТ».

3. Определены перспективы развития исследований адаптации управления процессом гибки с растяжением, а именно создание системы управления, которая будет в режиме реального времени корректировать весь процесс деформирования, а также предложено улучшение конструкции гибочно-растяжно прессы V-80.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ основных схем деформирования путем гибки с растяжением, показавший, что наиболее рациональной схемой деформирования на прессах с ЧПУ является схема растяжение с последующим изгибом и дополнительным растяжением, так как на таких прессах имеется возможность поддержки величины растягивающих усилий при изгибе, полученных на стадии предварительного растяжения. Выполнен анализ гибочно-растяжных прессов, в ходе которого выявлено что имеющиеся возможности гибочно-растяжных прессов с ЧПУ отслеживания и управления усилием и перемещениями на штоках растяжных гидроцилиндрах позволяют в пределах кинематических возможностей деформировать заготовки сегментов шпангоутов за один переход. Произведен научно-технический обзор способов совершенствования процесса гибки с растяжением по направлениям интенсификации процесса и адаптации разработанной схемы нагружения под действительные условия деформирования. Основываясь на имеющихся данных, было выявлено, что при гибке с растяжением заготовки, в зависимости условий трения, изменяются усилия и деформации заготовки. Определено, что при эксплуатации формообразующих оправок с жидкими смазочными материалами и антифрикционными покрытиями, условия трения постоянно изменяются, и как следствие результат формообразования профилей гибкой с растяжением нестабилен. Выполнен анализ условий трения в процессе гибки с растяжением прессованных профилей. Определено, что возможно применять закон Кулона-Амонтона при аналитической оценке сил трения, возникающих в процессе гибки с растяжением в условиях применения антифрикционных материалов.

2. Разработан алгоритм для моделирования процесса гибки с растяжением прессованного профиля под реальные условия формообразования. Для валидации корректности работы модели материала с заданной кривой упрочнения, проведено тестовое моделирование одноосного растяжения с оценкой влияния временного шага и типа решателя в конечно-элементной модели на разброс

величин получаемых напряжений и деформаций. Разработан модуль расчета траекторий деформирования, выполненный в САД-системе T-Flex, позволяющий определять как траектории движения заготовки для конечно-элементной модели, так и необходимые перемещения рабочих органов прессы. В программе Ls-Dyna проведены численные эксперименты по деформированию и оценке пружинений на заготовке (прессованном профиле), имеющей переменный радиус продольной кривизны. По результатам анализа конечно-элементной модели деформирования было выявлено, что в зависимости от коэффициента трения между заготовкой и обтяжным пуансоном, изменяется характер распределения деформаций, а также чем выше коэффициент трения, тем больше растягиваются края заготовки, не касающиеся пуансона, на этапе калибровки. Исходя из анализа пружинений заготовки определено, что величина пружинения заготовки при одном и том же режиме формообразования зависит от значений коэффициента трения. Определен допустимый диапазон разброса коэффициентов трения, при которых возможно устранить пружинение путем калибровки. Определены для рассматриваемой заготовки требуемые величины смещения штоков растяжных гидроцилиндров для различных коэффициентов трения. Для валидации корректности работы модели гибки с растяжением, проведено моделирование процесса гибки с растяжением по режимам с натурального эксперимента, в ходе которого прессованный профиль деформировался на прессе V-80 по схеме Р-И-Р. По результатам измерений удлинений контрольных элементов как в модели, так и в натурном эксперименте, построены кривые распределения деформаций по контрольным элементам, в которых максимальная разница между деформациями в модели и натурном эксперименте составляла не более 0,2 мм и 0,5 мм по растянутому и сжатому слоям соответственно.

3. Разработана методика адаптивного управления процессом формообразования гибкой с растяжением, позволяющая обеспечить стабильность формы и размеров изготавливаемых деталей. Определено, что для осуществления адаптации необходимо измерять величину фактических деформаций растяжения заготовки, которая зависит от условий трения. Выявлено, что для измерения

фактических деформаций заготовки наиболее предпочтительным из рассмотренных вариантов является применение навесных экстензометров, закрепляемых в зоне профильной заготовки, находящейся у цанговых зажимов прессы. Зона крепления обусловлена доступностью для крепления навесных экстензометров, а также тем, что данная зона заготовки в зависимости от величины коэффициента трения деформируется с различной интенсивностью, поддающейся измерения навесными экстензомерами.

4. Разработана и запатентована система адаптивного управления процессом гибки с растяжением, позволяющая реализовать методику адаптивного управления. Система построена по модульному принципу и состоит из следующих основных компонентов: промышленный компьютер; программируемый логический контроллер, связанный с исполнительными механизмами гибочно-растяжного прессы; датчики измерения деформаций, закрепляемые на концах заготовки. Разработано программное обеспечение – модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением, позволяющее формировать и быстро корректировать вариативные части управляющей программы.

5. Разработана адаптивная технология гибки с растяжением деталей авиационных конструкций на прессах с ЧПУ. В технологии применены все наработки диссертационной работы и объекты интеллектуальной собственности – система адаптивного управления процессом гибки с растяжением и модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением.

6. Проведена апробация разработанной адаптивной технологии гибки с растяжением на филиале ПАО «Ил» - Авиастар. Выявлено, что при использовании адаптации на этапе калибровки заготовок, разброс пружинений снижается с величины 11,7 мм до величины 0,4 мм. Результаты диссертационной работы внедрены в акционерном обществе «Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства».

7. Перспективами дальнейшей разработки темы диссертационной работы являются создание такой системы управления, которая будет в режиме реального времени корректировать весь процесс деформирования, а также модернизация конструкции гибочно-растяжного прессы V-80, позволяющая расширить номенклатуру изготавливаемых деталей. Для реализации описанных перспектив требуется колоссальный объем междисциплинарных исследований, с привлечением ученых и инженеров из области авиастроения, обработки металлов давлением, материаловедения, приборостроения, автоматизации, системного анализа и обработки информации, искусственного интеллекта и машинного обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодунов, Н.М. Формообразование профильных деталей на оборудовании с ЧПУ: учебное пособие / Н.М. Бодунов. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. - 92 с.
2. Гребеньков, О.А. Конструкция самолетов: учебное пособие / О.А. Гребеньков. - М.: Машиностроение, 1984. - 240 с.
3. Нечайкина, Т. А. Исследование влияния режимов гомогенизации и закалки на структуру и механические свойства раскатных колец из сплава В95о.ч.-Т2 / Т.А. Нечайкина, Н.Е. Блинова, А.Л. Иванов, О.Ю. Козлова, А.Е. Кожекин // Труды ВИАМ. - 2018. - №10. - С. 27-36.
4. Одинг, С.С Особенности изготовления профилей шпангоутов самолета из сплава В95очт2 / С.С. Одинг, В.И. Максименков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 12-2. - С. 117-121.
5. Михеев, М.М. Особенности технологии изготовления деталей типа «шпангоут» из высокопрочного алюминиевого сплава В95 / М.М. Михеев, В.Ю. Гусев, П.Н. Сильченко, И.В. Кудрявцев, В.И. Иванов // Решетневские чтения, Красноярск. - 2010. - С. 73-74.
6. Феоктистов, С.И., Учет влияния фрезерования на форму готовых деталей летательных аппаратов из прессованных профилей, получаемых методами изгиба / С.И. Феоктистов, С.В. Белых, М.М. Погарцева // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей III Всерос. науч.-практ. конф., 11-12 апреля 2013 г. Иркутск. - 2013. - С. 36-44.
7. Галкин, В.И., К вопросу выбора способа изготовления деталей типа сегмент шпангоута / В.И. Галкин, А.Р. Палтиевиц, Е.В. Галкин, Е.В. Преображенский, И.З. Захарова // Техология легких сплавов. – 2021. - № 1. - С. 60-67.
8. Müller, K.V. Bending of Extruded Profiles during Extrusion Process / K.V. Müller // Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys. - 2004. - P. 264-269.

9. Joe, Y.J. Process development of constant curvature extrusion for aluminum alloy / Y.J. Joe, S.K. Lee, B.M. Kim, K.H. Oh, S.W. Lee // Transactions of Material Processing. - 2007. - Vol.16. - No.7. - P. 555-560.

10. Илюшкин, М.В. Совершенствование технологий изготовления гнутых профилей и листовых изделий для авиационной промышленности / М.В. Илюшкин, В.А. Марковцев, В.В. Марковцева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2018. - № 4(3). - С. 427-434.

11. Марковцев, В. А. Сравнительный анализ технологий изготовления заготовок шпангоутов для панелей фюзеляжа самолетов / В.А. Марковцев, М. И. Хайрулин, В. В. Марковцева // Сборник научных трудов IV Международной научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки и 35-летию АО «Ульяновский НИАТ». Ульяновск, - 2019. - С. 66-73.

12. Марковцев, В. А. Продольная гибка заготовок шпангоутов панелей фюзеляжа из листовых материалов / В. А. Марковцев, А. Г. Попов, Д.А. Артемьев // Сборник научных трудов IV Международной научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки и 35-летию АО «Ульяновский НИАТ». Ульяновск. - 2019. - С. 61-65.

13. Марковцев В. А. Совершенствование технологии изготовления заготовок шпангоутов для панелей фюзеляжа самолетов / В.А. Марковцев, В.В.Марковцева, А.С. Баранов // Материалы III Международной научно-технической конференции, приуроченной к знаменательной дате - 90-летию со дня основания федерального государственного унитарного предприятия "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов" Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Москва. - 2022. - С. 609-619.

14. Братухин, А.Б. Современные технологии авиастроения / А.Б. Братухин, Ю.Л. Иванов, Б.Н. Марьин и др. - М.: Машиностроение, 1999. - 832 с.

15. Абибов, А.Л. Технология самолетостроения: учебное пособие для авиационных вузов / А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов и др. - М.: Машиностроение, 1982. - 551 с.

16. Горбунов, М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов: Учебник для вузов / М.Н. Горбунов. - М.: Машиностроение, 1981. - 224 с.
17. Барвинок, В.А. Основы технологии производства летательных аппаратов / В.А. Барвинок. - М.: Машиностроение, 1994. - 300 с.
18. Максименков, В.И. Изготовление деталей из листов и профилей для летательных аппаратов: учебное пособие / В.И. Максименков, В.И. Корольков, В.В. Самохвалов, М.В. Молод. - Воронеж: ВГТУ, 2011. - 39 с.
19. Лысов, М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.И. Лысов. - М.: Машиностроение, 1966. - 236 с.
20. Бодунов, Н.М. Моделирование в задачах производства летательных аппаратов: учебное пособие / Н.М. Бодунов. - Казань: КНИТУ-КАИ, 2015. - 328 с.
21. Борисов, В.Г. Пластическое формообразование тонкостенных пространственных деталей самолетов: Учебное пособие / В.Г. Борисов. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007. - 175 с.
22. Лысов, М.И. Формообразование деталей гибкой / М.И. Лысов, Н.В. Сосов. - М.: Машиностроение, 2001. - 388 с.
23. Бодунов, Н.М. Моделирование процессов гибки тонкостенных деталей авиатехники с учетом геометрической нелинейности: учебное пособие / Н.М. Бодунов. - Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2019. - 188 с.
24. Арышенский, Ю. М. Расчет пружинения при обтяжке с растяжением / Ю. М. Арышенский, В. В. Уваров, И. И. Калужский // Вопросы технологии производства летательных аппаратов: сб. ст. каф. "Производство летат. аппаратов". Самара, - 1975. - С. 4-8.
25. Вдовин, С.И. К расчету пружинения при гибке труб / С.И. Вдовин, Н.И. Маркин, К.С. Лунин, Н.В. Татарченков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2014. - №2. - С. 77-81.
26. Кретов, И.А. Повышение стабильности формообразования профильных заготовок на гибочно-растяжном оборудовании с адаптивным программным управлением : специальность 05.03.05 «Технологии и машины обработки

давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кретов Илья Алексеевич ; Воронежский государственный технический университет. - Воронеж, 2005. - 187 с.

27. Сурудин, С.В. Разработка способов обтяжки обводообразующих оболочек двойной кривизны применительно к прессам с программным управлением : специальность 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сурудин Сергей Викторович ; Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. - Самара, 2016. - 154 с.

28. Тищенко, И.И. Совершенствование технологии обтяжки крупногабаритных оболочек на основе конечно-элементного моделирования процессов формообразования: специальность 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тищенко Иван Иванович; Воронежский государственный технический университет. - Воронеж, 2007. - 178 с.

29. LS-DYNA Manual R13.0 Vol I.

30. LS-DYNA Manual R13.0 Vol II.

31. LS-DYNA Manual R13.0 Vol III.

32. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. - М.: Металлургия, 1979. - 208 с.

33. А. с. № 679283 СССР, МПК В21D 11/20. Способ гибки с растяжением : № 2594708/25-27 : заявл. 27.03.1978 : опубл. 15.08.1979 / Гусев В.С., Макаров Н.М.

34. А. с. № 829258 СССР, МПК В21D 11/20. Способ гибки с растяжением : № 2800424/25-27 : заявл. 20.07.1979 : опубл. 15.05.1981 / Гусев В.С.

35. Патент № 1439825 Российская Федерация, МПК В21D 11/20. Способ гибки с растяжением : № 4162392/27 : заявл. 15.12.1986 : опубл. 09.08.1995 / Черных И.А., Максименков В.И., Бобровников С.В., Карпухин А.Н., Мякишев В.А. ; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля.

36. А. с. № 1417958 СССР, МПК В21D 7/025 Способ гибки тонкостенных профилей : № 4124274/27-27 : заявл. 24.09.1986 : опубл. 23.08.1988 / Скоморохов В.Д., Шумилов С.В.

37. Борисов, В.Г. Процессы изготовления тонкостенных деталей самолетов методами пластического формообразования: учебное пособие / В.Г. Борисов. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. - 236 с.

38. А. с. № 1558530 СССР, МПК В21D 7/02, В21D 11/20. Способ гибки профилей уголкового сечения : № 4381200/31-27 : заявл. 23.02.1988 : опубл. 23.04.1990 / Ершов В.И., Макаров К.А., Жарков С.А.

39. А. с. № 341561 СССР, МПК В21D 7/02. Способ получения деталей из профилей путем изгиба : №1134601/25-27 : заявл. 13.02.1967 : опубл. 14.06.1972 / Борисов В.Г., Лысов М.И.

40. Панферова, Е.А. Влияние скорости при моделировании процесса формообразования профильных заготовок методом гибки с растяжением в горячем состоянии / Е.А. Панферова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, - 2014. - С. 92-97.

41. Сапаровский, С.В. Новые способы холодной штамповки / С.В. Сапаровский, Е.П. Смеляков, А.Д. Комаров. - Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1969. - 180 с.

42. Патент № 2252831 Российская Федерация, МПК В21D 7/025, В21D 11/20. Способ управления процессом гибки с растяжением профильных деталей : № 2003131561/02 : заявл. 27.10.2003 : опубл. 27.05.2005 / Одинг С.С., Кретов И.А. ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет.

42. Патент 3948071, United States, МПК В21D 11/04. Tension control for stretch-forming machine : № 564677 : заявл. 03.04.1975 : опубл. 06.04.1976 / Robert L. Lieberman, Dale H. De Mott. ; заявитель и патентообладатель Demott Electronics Co.

43. Деревцов, А.О. Особенности обработки изделий из алюминиевых сплавов / А.О. Деревцов // Евразийский научный журнал. - 2018. - С. 71-72.

44. Алиева, С.Г. Промышленные алюминиевые сплавы / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. - М.: Metallurgy, 1984. - 528 с.
45. Орлов, П.Н. Краткий справочник металлиста / П.Н. Орлов, Е.А. Скороходов, А.Д. Агеев и др. - М.: Машиностроение, 1986. - 960 с.
46. ПИ 1.2.255-83. Термическая обработка полуфабрикатов и деталей из алюминия и алюминиевых деформируемых сплавов.
47. Blau, P.J. Friction science and technology: from concepts to applications / P.J. Blau. - 2009. - p. 436.
48. Станкевич, А.В. Совершенствование технологического процесса обтяжки листовых деталей большой толщины / А.В. Станкевич, И.В. Кремза, Р.Ф. Крупский, А.А. Кривенок // Будущее машиностроения России. - 2010. - С. 41-45.
49. **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. - № 1 (99). - С. 41-47.
50. Ривин, Г.Л. 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. - № 4(3). - С. 414-416.
51. **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. - 2019. - С. 427-431.
52. Патент № 205378 Российская Федерация, МПК C09D 127/18, C09D 5/00, C09D 7/40, C01B 32/158. Специальное антифрикционное покрытие для защиты и повышения износостойкости поверхности технологической оснастки : №2021108372 : заявл. 29.03.2021 : опубл. 13.07.2021 / Федоров А.А., Кошкина

А.О., Салаева А.В., Салаев Р.А., **Карпухин Е.Г.** ; заявитель и патентообладатель ООО «Прогрессивные авиационно-космические технологии».

53. Михеев, В.А. Разработка процессов формообразования обтяжкой обводообразующих оболочек летательных аппаратов с минимальной разнотолщинностью : специальность 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Михеев Владимир Александрович ; Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. - Самара, 2004. - 338 с.

54. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф.Майсснер. - М.: Машиностроение, 1984. - 264 с.

55. Берсудский А.Л. Методика расчета оптимальной толщины антифрикционных покрытий / А.Л. Берсудский // Вестник Самарского аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королева. - 2006. - №2 (10). - С. 75-80.

56. Каргин, В.Р. Теория обработки металлов давлением: учебное пособие / В.Р. Каргин. - Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. - 112 с.

57. Грудев, А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В.Т. Тилик. - М.: Металлургия, 1982. - 312 с.

58. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов. - М.: Металлургия, 1978. - 360 с.

59. Семенов, И.Е. Повышение жёсткости эластичного рабочего инструмента для обработки тонколистового металла путём создания композитного материала на основе полиуретановых эластомеров и синтетических арамидных тканей / И.Е. Семенов, Д.В. Савчук // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). - 2020. - № 12(64). - С. 33-41.

60. Тыняный, А. Использование ANSYS Explicit STR в задачах обработки металлов давлением / А. Тыняный // САПР и графика 8. - 2012. - С.76-78.

61. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе Ls-dyna: учебное пособие / М.В. Илюшкин. - Ульяновск: УлГТУ, 2017. - 125 с.

62. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение = Metals. Methods of tension test : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.07.84 № 2515 : введен взамен ГОСТ 1497-73 : дата введения 01.01.86 / разработан Министерством черной металлургии СССР. - Москва : Стандартиформ, 2008. - 22 с.

63. Крагельский, И.В. Коэффициенты трения. Справочное пособие / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. М: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. - 222 с.

64. Дубов, Г.М. Анализ конструкций тензорезисторов и методики их подбора для комплектации упругого элемента прототипа линейного сенсора / Г.М. Дубов, Р.А. Тимофеев // Сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференция молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ». Кемерово. - 2021. - С. 42103.1-42103.5.

65. ISO 9513:2012. Metallic materials – Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing = Материалы металлические. Калибровка экстензометров, используемых в одноосных испытаниях : международный стандарт. – Швейцария : ISO, 2012. - 52 с.

66. ГОСТ Р 56407-2015. Бережливое производство. Основные методы и инструменты = Lean production. Basic methods and tools : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 мая 2015 г. № 448-ст : введен впервые : дата введения 02.06.2015 / разработан ЗАО "Центр "Приоритет". - Москва : Стандартиформ, 2015. - 12 с.

67. ТУ 1-804-592-2020. Полуфабрикат прессованный (профиль) из алюминиевого сплава марки В95оч.

68. **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. - № 6. - С. 257-264.

69. **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.

70. Markovtsev, V.A. Improvement of the processes of forming tight shells of double curvature / V.A. Markovtsev, **E.G. Karpukhin**, V.A. Mikheev, R.De. Alvarenga, A.Yu. Kosolapova // III International Scientific Conference. Volume 1155. Krasnoyarsk, - 2021. - P.12014.1-P.12014.11.

71. Патент № 28082942 Российская Федерация. МПК В21D 11/20. Система адаптивного управления процессом гибки с растяжением профилей для гибочно-растяжного прессы : № 2023107026 : заявл. 23.03.2023 : опубл. 28.11.2023 / **Карпухин Е.Г., Марковцев В.А.** ; заявитель и патентообладатель **Карпухин Е.Г.**

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

73. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. - Л: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. - 6 изд. - 520 с.

74. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатации машин) / Д. Н. Гаркунов. - М.: Издательство МСХА, 2002. - 632 с.

75. Ермолаев, В. И. Повышение эффективности управления на автоматизированных профилегибочных машинах за счет уточнения математической модели процесса формообразования и оперативной коррекции

управляющих программ : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ермолаев Вячеслав Иванович ; Саратовский государственный технический университет. - Саратов, 2004. - 169 с.

76. Groshikov, A.I. Zagotovitel'no-shtamповочные работы в самолетостроении / A.I. Groshikov, V.A. Malafeyev. - M.: Mashinostroyeniye, 1976. - 440 с.

78. Odin, S.S. Iskazheniye sечeniya профилейной заготовки в процессе ее формообразования на гибочно-растяжном оборудовании / S.S. Odin, V.V. Korzunina, E.A. Parfenova // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - 2012. - № 4. - С. 137-139.

79. Ermolaeva, V.V. Analiz protsessov gibki s rastyazheniym / V.V. Ermolaeva, V.I. Ermolaev, S.G. Puchkin // Molodoy uchenyi/ Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal. - 2017. - Частъ II. - С. 95-97.

79. ПИ. 1.4.1977-89. Детали заготовительно-штамповочного производства. Общетехнические требования.

80. Mozhnin, E.N. Gibka, obtyazhka i pravka na pressesakh. Tekhnologiya i oborudovaniye / E.N. Mozhnin. - M.: MashGIZ, 1959. - 360 с.

81. Eliseyev, V.V. Eksperimental'noye opredeleniye koэффициентов трения по методу obtyazhki / V.V. Eliseyev, L.V. Khlivnenko, A.M. Golytsev, S.S. Odin // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - 2018. - №6. - С.135-139.

82. Kochetkov, A.V. Obratnaya zadacha gibki s rastyazheniym: vosstanovleniye pryamolinейной формы slozhnoprofilейных деталей / A.V. Kochetkov, V.B. Gnityko, V.I. Ermolaev, V.V. Ermolaeva // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIYE». - 2013. - №3. - С. 1-4.

83. Drobot, Yu. B. Teoreticheskyy raschet parametrov protsessа gibki s rastyazheniym tonkostennых профилей / Yu.B. Drobot // Kuybyshevskiy aviatsionnyy institut trudy. Vypusk XX. Частъ II. - 1965. - С. 251-260.

84. Кочетков, А.В. Сравнение процессов гибки с растяжением с управлением по силам и с управлением по перемещениям / А.В. Кочетков, В.Б. Гнитько, В.И. Ермолаев, В.В. Ермолаева // Кузнечно-штамповочное производство. обработка материалов давлением. - 2013. - №2. - С.21-24.

85. Санкин, Ю.Н. Минимизация упругого последствия при гибке профилей на обтяжных пуансонах / Ю.Н. Санкин, С.М. Манзулин // Механика и процессы управления. Сборник научных трудов УлГТУ. - 2010. - С.71-76.

86. Кочетков, А.В. Расчет пружинения детали при гибке с растяжением с учетом дополнительных пластических деформаций при разгрузке / А.В. Кочетков, В.Б. Гнитько, В.И. Ермолаев, В.В. Ермолаева // Заготовительные производства в машиностроении. - 2014. - №9. - С. 25-27.

87. Дробот, Ю. Б. К вопросу определения технологических параметров гибки с растяжением тонкостенных профилей / Ю.Б. Дробот // Куйбышевский авиационный институт труды. Выпуск XX. Часть II. - 1965. - С. 91-105.

88. Нестягина, И.С. Моделирование процесса гибки-обтяжки деталей из профилей на станках ПГР С ЧПУ / И.С. Нестягина, Н.М. Бодунов // VIII Королевские чтения: Всерос. молодежн. науч. конф. с междунар. участием, 4-6 окт. - 2005. - С.177

89. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 4 изд. - 423 с.

90. Филимонов, В. И. Теория обработки металлов давлением: учебное пособие / В.И. Филимонов. - Ульяновск: УлГТУ, 2012. - 208 с.

91. He, J. Forming Limits Under StretchBending Through Distortionless and Distortional Anisotropic Hardening / J. He, B. Gu, Y. Li, S. Li // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 2018. - Vol. 140. P. 121013-1-121013-14.

92. Одинг, С.С. Адаптивное программное управление процессом обтяжки профильных заготовок из алюминиевых сплавов / С.С. Одинг, И.А. Кретов // Кузнечно-штамповочное производство. обработка материалов давлением. - 2004. - № 7. С.40-44.

93. Рекомендации по технологичности самолетных конструкций. Под общим руководством и редакцией проф. В.В. Бойцова. Часть четвертая. Технологичность конструкции деталей из листового материала, профилей и труб. - М.: Оборонгиз, 1959. - 739 с.

94. Белянин, П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов / П.Н. Белянин. - М.: Машиностроение, 1979. - 256 с.

95. Рекомендации по технологичности самолетных конструкций. Под общим руководством и редакцией проф. С.М. Лещенко. - М.: НИАТ, 1972. - 3 изд. - 683 с.

96. Li, Y. Springback Study on Profile Flexible 3D Stretch-Bending Process Using the Neural Network / Y. Li, C. Liang, X. Lin, J. Liang, Z. Cai, F. Teng // Hindawi Advances in Materials Science and Engineering Volume. - 2019. - P.1-9.

97. Merkleina, M. Influence of a short-term heat treatment on the formability and ageing characteristics of aluminum profiles / M. Merkleina, M. Lechnera, M. Graser // Lasers in Manufacturing Conference. - 2015. - P.1-10.

98. Ильюшин, А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А. Ильюшин. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 247 с.

99. Погарцева, М.М. Исследование процессов формообразования деталей летательных аппаратов методами изгиба с растяжением и последующим удалением части материала: специальность 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Погарцева Мария Михайловна; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. - Комсомольск-на-Амуре, 2020. - 186 с.

100. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. / Р. Галлагер - М.: Мир, 1984. - 428 с.

101. Круглов, В. И. Методология научных исследований в авиа- и ракетостроении: учебное пособие / В. И. Круглов, В. И. Ершов, А. С. Чумадин, В. В. Курицына. - М.: Логос, 2011. - 432 с.

102. Ren, S. Intelligent Prediction of Process Parameters for Bending Forming / S. Ren, Y. Lai, G. Wu, J. Gu, Y. Dai // The Open Mechanical Engineering Journal. - 2011. - P. 26-31.

103. Ендогур, А.И. Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов: Учебное пособие / А.И. Ендогур. - М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. - 540 с.

104. Гречников, Ф.В. Теория пластического деформирования металлов: учебник / Ф.В. Гречников, В.Р. Каргин. - Самара: Издательство Самарского университета, 2021. - 448 с.

105. Cao, F. Electrically Assisted Stretch Bending of Aluminum Extruded Profile / F. Cao, Yu. Zeng, B. Liu // MATEC Web of Conferences 175. - 2018. - P. 1-5.

106. Инструкция №1021-73. Конструирование и технология изготовления деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов В95; В95 п.ч.; В93 и В93 п.ч.

107. Liu, Y. Numerical Simulation of Stretch Bending for L-section Aluminum Alloy Profile / Y. Liu, L. Song, J. Yin, F. Ma, Z. Sha, D. Yang, S. Zhang // Electronic Journal of Structural Engineering 18(2). - 2018. - P. 67-75.

108. Liua, T. Springback of extruded 2196-T8511 and 2099-T83 Al-Li alloys in stretch bending / T. Liua, Y. Wanga, J. Wua, X. Xiaa, W. Wangb, S. Wangb // Procedia Engineering 81. - 2014. - P. 981-986.

109. Бочаров, Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование. Учебник для студентов высших учебных заведений / Ю.А. Бочаров. - М.: Издательский центр "Академия", 2008. - 480 с.

110. Zhang, C. Research on Metal Elastic - Plastic Deformation / C. Zhang // International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM). - 2016. - Volume-3. - Issue-6. - P.474-476.

111. Колганов, И. М. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1: Учебное пособие / И. М. Колганов, П. В. Дубровский, А. Н. Архипов. - Ульяновск: УлГТУ, 2003. - 148 с.

УТВЕРЖДАЮ



АО «Ульяновский НИАТ»

к.т.н. М.В. Илюшкин

«12» февраля 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Карпущина Евгения
Геннадьевича

Комиссия в составе:

председатель: зам. генерального директора по науке, к.т.н.

Илюшкин Максим Валерьевич

члены комиссии: начальник НПК-100

Графова Эмма Николаевна

зам. генерального директора по производству

Баранов Александр Сергеевич

подтверждает, что диссертационная работа, посвященная разработке адаптивной технологии гибки с растяжением профильных деталей авиационных конструкций на прессах с ЧПУ, имеет прикладной характер и высокий потенциал использования для производства деталей авиационной техники. Нарботки диссертационной работы, в частности алгоритм для моделирования процесса гибки с растяжением и методика адаптивного управления процессом формообразования гибкой с растяжением успешно применены на нашем предприятии при разработке технологических режимов гибки с растяжением заготовок шпангоутов на пресс V-80. Применение предварительно определенных величин дополнительного смещения штоков растяжных гидроцилиндров прессы в зависимости от условий трения и деформаций заготовки значительно снижают затраты на перепроектирование и доработку в металле рабочего контура гибочных пуансонов.

Разработанные и запатентованные Карпухиным Е.Г. система адаптивного управления процессом гибки с растяжением для гибочно-растяжного пресса (патент на изобретение №2808294) и модуль адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666945) использованы при разработке системы ЧПУ пресса ПГР-6.

Председатель комиссии

Члены комиссии



Илюшкин М.В.

Графова Э.Н.

Баранов А.С.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2808294

**Система адаптивного управления процессом гибки с
растяжением профилей для гибочно-растяжного пресса**

Патентообладатель: *Карпухин Евгений Геннадьевич (RU)*

Авторы: *Карпухин Евгений Геннадьевич (RU), Марковцев
Владимир Анатольевич (RU)*

Заявка № 2023107026

Приоритет изобретения **23 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **28 ноября 2023 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **23 марта 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429c6b01673573164ba796783b73b4ae7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023666945

**Модуль адаптации управляющей программы
нагрузки для гибочно-растяжных прессов с
числовым программным управлением**

Правообладатель: *Карпухин Евгений Геннадьевич (RU)*

Автор(ы): *Карпухин Евгений Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2023665942

Дата поступления 27 июля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 августа 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 429266026710c3354ba195683a73b4aa7
Выдан: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Листинг кода модуля адаптации управляющей программы нагружения для гибочно-растяжных прессов с числовым программным управлением

```
import os

from PyQt5 import QtWidgets, QtCore, Qt
from PyQt5.QtGui import QPalette
from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow, QMenuBar, QMenu,
QFileDialog, QTabWidget, QVBoxLayout, QWidget, \
    QPushButton, QLabel, QDialogButtonBox, QTextEdit, QTableWidgetItem

import sys

from PyQt5.uic.properties import QtGui

class Window(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super(Window, self).__init__()
        self.setWindowTitle("Модуль адаптации управляющей программы
нагружения для гибочно-растяжных прессов с ЧПУ")
        self.setGeometry(300, 250, 500, 330)
        self.setFixedSize(500, 330)
        self.createMenuBar()
```

```

# интерфейс задания и индикации данных для адаптации
self.adap_interface = QtWidgets.QTableWidget(self)
self.adap_interface.setGeometry(10, 90, 471, 201)
self.adap_interface.setColumnCount(3)
self.adap_interface.setHorizontalHeaderLabels(
    ["Деформация", "Коэффициент трения", "Требуемое перемещение
XL,XR"])
self.adap_interface.setColumnWidth(1, 130)
self.adap_interface.setColumnWidth(2, 190)
self.adap_interface.setRowCount(100)

# Заполнение стандартными данными ячеек таблицы, с целью возможности
сохранения пустых ячеек
for i in range(self.adap_interface.rowCount()):
    self.adap_interface.setItem(i, 0, QTableWidgetItem("0.0"))
    self.adap_interface.setItem(i, 1, QTableWidgetItem("0.0"))
    self.adap_interface.setItem(i, 2, QTableWidgetItem("0.0"))
self.adap_interface_1 = QtWidgets.QLabel(self)
self.adap_interface_1.setText("Данные адаптации")
self.adap_interface_1.setGeometry(10, 70, 281, 21)

# Деформации с датчика
self.deform_1 = QtWidgets.QLabel(self)
self.deform_1.setText("Деформация удлинения \nфактическая с
экстензометра")
self.deform_1.setGeometry(10, 30, 153, 31)

# Индикация деформации
self.deform_indication = QtWidgets.QTextEdit(self)

```

```
self.deform_indication.setGeometry(167, 30, 141, 31)

# Кнопка адаптировать

self.adaptive = QtWidgets.QPushButton(self)

self.adaptive.setText("Адаптировать")

self.adaptive.setGeometry(20, 300, 221, 21)

self.adaptive.clicked.connect(self.func_of_buttons)

# Кнопка получить деформацию

self.adaptive = QtWidgets.QPushButton(self)

self.adaptive.setText("Получить деформацию")

self.adaptive.setGeometry(320, 30, 130, 21)

self.adaptive.clicked.connect(self.func_of_buttons)

# Табло состояния адаптации

self.adaptive_status = QtWidgets.QLabel(self)

self.adaptive_status.setGeometry(260, 300, 206, 21)

self.adaptive_status.setStyleSheet("background-color: yellow; border: 2px solid
black;")

# Открытая управляющая программа

self.control_program_status = QtWidgets.QLabel(self)

self.control_program_status.setGeometry(280, 70, 281, 21)

self.control_program_status.setText("Управляющая программа не выбрана")

def createMenuBar(self):

    self.menuBar = QMenuBar(self)

    self.setMenuBar(self.menuBar)

    self.fileMenu = QMenu("&Файл", self)

    self.menuBar.addMenu(self.fileMenu)

    self.fileMenu.addAction("Новый", self.new_file)
```

```
self.fileMenu.addAction("Открыть", self.open_and_save)
self.fileMenu.addAction("Открыть УП", self.open_and_save)
self.fileMenu.addSeparator()
self.fileMenu.addAction("Сохранить", self.open_and_save)
self.fileMenu.addSeparator()
self.fileMenu.addAction("Закрыть", self.close)
```

```
@QtCore.pyqtSlot()
```

```
def open_and_save(self):
```

```
    action = self.sender()
```

```
    if action.text() == "Открыть":
```

```
        fname = QFileDialog.getOpenFileName(self)[0]
```

```
        try:
```

```
            f = open(fname, "r")
```

```
            with f:
```

```
                data = f.readlines()
```

```
                # установить при открытии файла значения в таблицу
```

```
                for i in range(len(data)):
```

```
                    first_column = data[i][0:19].replace(" ", "")
```

```
                    second_column = data[i][20:39].replace(" ", "")
```

```
                    third_column = data[i][40:59].replace(" ", "")
```

```
                    self.adap_interface.setItem(i, 0, QTableWidgetItem(first_column))
```

```
                    self.adap_interface.setItem(i, 1, QTableWidgetItem(second_column))
```

```
                    self.adap_interface.setItem(i, 2, QTableWidgetItem(third_column))
```

```
            f.close()
```

```

except FileNotFoundError:
    print("Файл не найден")
elif action.text() == "Открыть УП":
    fname = QFileDialog.getOpenFileName(self)[0]
    try:
        f = open(fname, "r")
        with f:
            data = f.read()
            self.control_program_status.setText(os.path.realpath(f.name))
            f.close()
    except FileNotFoundError:
        print("Файл не найден")
elif action.text() == "Сохранить":
    fname = QFileDialog.getSaveFileName(self)[0]
    try:
        f = open(fname, "w")

        for i in range(self.adap_interface.rowCount()):
            spaces_column1 = (20 - len(self.adap_interface.item(i, 0).text())) * " "
            spaces_column2 = (20 - len(self.adap_interface.item(i, 1).text())) * " "
            spaces_column3 = (20 - len(self.adap_interface.item(i, 2).text())) * " "
            f.write(self.adap_interface.item(i, 0).text() + spaces_column1 +
self.adap_interface.item(i,
                                                                    1).text() +
spaces_column2 + self.adap_interface.item(
                                                                    i, 2).text() + spaces_column3 + "\n")

```



```

        f.close()

    except FileNotFoundError:
        print("Файл не найден")

def new_file(self):
    action = self.sender()

    for i in range(self.adap_interface.rowCount()):
        self.adap_interface.setItem(i, 0, QTableWidgetItem("0.0"))
        self.adap_interface.setItem(i, 1, QTableWidgetItem("0.0"))
        self.adap_interface.setItem(i, 2, QTableWidgetItem("0.0"))
    self.deform_indication.clear()

def func_of_buttons(self):
    action = self.sender()

    if action.text() == "Получить деформацию":
        current_deformation_file = open("current_deformation.txt", "r")
        self.deform_indication.setText(current_deformation_file.read())

    elif action.text() == "Адаптировать":
        if self.control_program_status.text() == "Управляющая программа не
выбрана":
            self.adaptive_status.setText("Не адаптировано")
            self.adaptive_status.setStyleSheet("background-color: red")
        elif self.deform_indication.toPlainText() == "":
            self.adaptive_status.setText("Не адаптировано")
            self.adaptive_status.setStyleSheet("background-color: red")

```

```

else:

    current_pgm_file = open(self.control_program_status.text(), "a")

    for i in range(self.adap_interface.rowCount()):

        if          float(self.deform_indication.toPlainText())          ==
float(self.adap_interface.item(i, 0).text()):

            # Название блока управляющей программы

            current_pgm_file.write('<!-- adaptation -->\n')

            # Номер блока управляющей программы

            current_pgm_file.write('\t\t<!-- block 99: move -->\n')

            # Необходимые координаты перемещений

            current_pgm_file.write('\t\t<Param ID="1Z01" Value="' + str(
                self.adap_interface.item(i, 2).text()) + "'/>    <!-- xr -->\n')

            current_pgm_file.write('\t\t<Param ID="1Z01" Value="' + str(
                self.adap_interface.item(i, 2).text()) + "'/>    <!-- xl -->\n')

            self.adaptive_status.setText("Адаптировано")

            self.adaptive_status.setStyleSheet("background-color: green")

            break

        else:

            self.adaptive_status.setText("Не адаптировано")

            self.adaptive_status.setStyleSheet("background-color: red")

            continue

def application():

    app = QApplication(sys.argv)

    window = Window()

```

```
window.show()
```

```
sys.exit(app.exec_())
```

```
if __name__ == "__main__":
```

```
    application()
```