

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Бачурин Александр Сергеевич



**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ  
ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ  
МЕЖОПЕРАЦИОННОГО ПРИПУСКА**

05.07.02 –Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов.

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор  
Курлаев Николай Васильевич

Новосибирск 2016

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1. Переплёт фонаря как элемент конструкции ЛА	11
1.2. Технологический процесс изготовления авиационных деталей на станках ЧПУ	15
1.3. Обработка алюминиевых сплавов резанием и термообработка.	19
1.4. Причины возникновения остаточных закалочных напряжений и деформаций, их влияние на последующие технологические операции	24
1.5. Методы определения остаточных напряжений	28
1.6. Вывод по главе, цель и задачи исследования	31
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ	32
2.1. Общие принципы моделирования и упрощающие положения	32
2.2. Настройки конечно-элементного решения и макросы	37
2.3. Учет процесса погружения в закалочную среду	45
2.4. Выводы по разделу	48
ГЛАВА 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ЗАКАЛОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ДЕТАЛЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	49
3.1. Моделирование закалки заготовки детали летательного аппарата с учетом погружения в закалочную среду	49
3.2. Закалка стержня, оценка влияния погружения на остаточные деформации	55
3.3. Моделирование закалки сечения заготовки детали летательного аппарата с различным припуском	58
3.4. Выводы по разделу	65

ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ МЕЖОПЕРАЦИОННОГО ПРИПУСКА	66
4.1. Влияние величины межоперационного припуска на деформации деталей ЛА	66
4.2. Выбор величины припуска путём оптимизации показателя	70
4.3 Выводы по разделу	77
ГЛАВА 5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ	79
5.1. Технологический процесс механической обработки рамы переплета фонаря	79
5.2. Закалка заготовки рамы переплѐта фонаря	84
5.3. Результаты изменения технологического процесса изготовления рамы переплета фонаря	87
5.4. Выводы по разделу	95
Общие результаты и выводы	96
Список литературы	98
Приложение	103

## ВВЕДЕНИЕ

Требования к современным летательным аппаратам (ЛА) постоянно возрастают. Реальность диктует необходимость снижения массы конструкции ЛА, повышению ресурса и экономичности. Повышение экономичности достигается, в том числе и снижением аэродинамического сопротивления, в особенности носового отсека (кабины пилотов). Требование снижения массы приводит к увеличению количества крупногабаритных фрезерованных деталей в конструкции. Примером может служить применение подобных деталей в конструкции фонаря кабины пилотов. Наиболее выгодным представляется выполнять переплёт фонаря в виде детали рамного типа. Это обусловлено необходимостью внесения неоднородности в конструкцию фюзеляжа (вырезы для фонаря кабины) выполненной по схемам монокок или полумонокок. Обеспечение минимального веса конструкции возможно только за счет перехода от одной силовой схемы к другой. Это связано с тем, что остекление не должно воспринимать дополнительных нагрузок, а переплет должен обеспечивать достаточную жесткость.

Широкое внедрение высокопроизводительного механообрабатывающего оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), на предприятиях авиационной отрасли, позволяет снизить затраты на производство крупногабаритных деталей, а металлургическая промышленность в состоянии обеспечить производство заготовок необходимых размеров. Однако остается острой проблемой обеспечение точности изготовления деталей. Нередки случаи, когда полностью готовая деталь, прошедшая все циклы изготовления, признается не годной для сборочного производства ввиду значительных отклонений от требуемой геометрии.

Современный уровень точности механообрабатывающего оборудования позволяет проводить обработку резанием с точностью до  $\pm 0,001$  мм, что обеспечивает покрытие всего диапазона возможных отклонений, разрешенных при производстве деталей ЛА.

Причина, по которой детали после изготовления на столь точном оборудовании оказываются вне допуска – остаточные напряжения, возникшие в ходе производства.

Каждый этап производства вносит изменения в поле напряжений заготовки и как следствие детали. При производстве крупногабаритных деталей ЛА заготовка проходит различные операции механической обработки резанием, между которыми зачастую присутствует термическая обработка. Это обусловлено невозможностью термообработки заготовки больших размеров, ввиду ограниченности глубины прокаливаемости.

Термическая обработка применяется для улучшения механических свойств материала. Закалка, как вид термообработки, характеризуется быстрым процессом охлаждения. И как следствие, большим перепадом температуры внутри заготовки, приводящим к накоплению внутренних остаточных напряжений.

Дальнейшая обработка резанием сопровождается снятием слоёв материала и как следствие нарушением равновесного напряженно-деформированного состояния заготовки. Далее происходит изменение формы заготовки, под действием нового поля напряжений. Предсказать напряженное состояние такой заготовки и детали становится практически невозможным, а следовательно, и невозможно предсказать деформированное состояние.

Операции механической обработки резанием предшествующие закалке снимают черновой припуск и оставляют межоперационный припуск определенной величины. На производстве, обычно, он соответствует таким размерам заготовки, при которых становится возможной закалка на полную глубину материала. Технолог, назначая такой припуск, руководствуется желанием оставить как можно больше материала на припуск, дабы иметь возможность вписать деталь в заготовку и снизить риск неписываемости детали в заготовку, поменявшую свою форму в виду наличия остаточных закалочных напряжений, после удаления чернового припуска на первых операциях механической обработки резанием.

У инженера-технолога не существует никаких указаний по выбору величины межоперационного припуска с целью снижения остаточных напряжений. Определение величины припуска осуществляется опытным путем и ведет к увеличению издержек производства и зачастую браку.

Таким образом, встает вопрос о снижении остаточных закалочных деформаций, провоцирующих изменение геометрии детали, после механической обработки путём выбора межоперационного припуска является важной задачей для повышения точности производства деталей ЛА, так как непосредственно влияет на их качество.

**Цель работы.** Повышение точности изготовления крупногабаритных фрезерованных авиационных деталей, заготовки которых подвергаются механической обработке после закалки, с наименьшими издержками технологического процесса.

**Методика исследования.** В работе используется подход к решению обозначенной проблемы, которая базируется на численном методе определения остаточных закалочных напряжений и деформаций. Использовались программные продукты: математический пакет Mathcad, конечно-элементный пакет ANSYS. Экспериментальные исследования по закалке деталей ЛА проводились в лабораторной электрической печи камерного типа СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ и в печи для крупногабаритных деталей. Измерения выполнялись на контрольно-измерительной машине AcuraZeiss и при помощи фото-микроскопа Nikon MM - 400.

#### **Научная новизна.**

1. Определены характерные черты назначения припусков перед закалкой с учетом геометрических особенностей крупногабаритных авиационных деталей двойной кривизны с малой жесткостью. Расширен метод определения припусков под закалку перед механической обработкой с учетом технологической наследственности.

2. Выявлены основные факторы технологической наследственности от закалки, установлены механизмы их влияния на изменение геометрии деталей

после механической обработки. Определена степень влияния закалки, а также величины припуска под закалку, на точность изготовления авиационных деталей.

3. Экспериментально подтверждено влияние процесса погружения в закалочную среду на остаточные деформации. Обозначены геометрические особенности деталей, наиболее склонных к влиянию эффекта погружения.

### **Практическая значимость работы.**

1. Определены параметры математического моделирования в конечно-элементном пакете, позволяющие достигнуть приемлемой точности решения связанной задачи закалки. Разработана процедура для конечно-элементного пакета ANSYS, позволяющая моделировать процесс погружения детали в закалочную среду. Определены параметры решателя при решении задач с большими температурными градиентами.

2. Выявлена взаимосвязь уровня деформаций детали с направлением погружения. Определены предпочтительные направления погружения в закалочную среду крупногабаритных деталей сложной геометрии.

3. Составлены рекомендации по выбору припуска под закалку для деталей, подвергаемых в дальнейшем механической обработке. Рекомендации являются простыми и не требуют проведения математического моделирования закалки для каждой детали.

**Апробация работы** проводилась на следующих конференциях:

- Научно-технических конференциях «Дни науки НГТУ-2009» и «Дни науки НГТУ-2010» по секции «Производство и эксплуатация летательных аппаратов» (г. Новосибирск, 19 марта 2009 г. и 23 марта 2010 г.);

- «Дни науки НГТУ-2012» и «Дни науки НГТУ-2013» на пленарных заседаниях (г. Новосибирск, 12 марта 2012 г. и 14 марта 2013 г.);

- Новосибирской внутривузовской научно-технической конференции магистрантов и аспирантов на иностранных языках «Инновационные технологии Сибири» (г. Новосибирск, 7 апреля 2011г.);

- XII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос (г. Новосибирск, 20-22 апр. 2011 г.);

- XIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 200-летию Бородинской битвы (г. Новосибирск, 18-20 апреля 2012г.);

- Он-лайн совещании ОАО «ОАК» с опорными ВУЗами по перспективным НИОКР в области авиационной промышленности (Москва-Новосибирск, 3 октября 2013г.);

- VII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2013г.).

Публикации: основное содержание диссертации отражено в 13-ти статьях.

#### **Рекомендуемых Перечнем ВАК –**

1. Влияние величины припуска на остаточные закалочные напряжения деталей самолета/ А.С. Бачурин, К.Н. Бобин, К.А. Матвеев, Н.А. Рынгач, Н.В. Курлаев // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты, 2013.- №3. – С. 31-35.

2. Численное моделирование процесса закалки алюминиевых деталей/ А.С. Бачурин, К.Н. Бобин, К.А. Матвеев, Н.А. Рынгач, Н.В. Курлаев // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты, 2013.- №3. –С. 94-97.

3. Влияние закалки на остаточные деформации деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов/ А.С. Бачурин, К.Н. Бобин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // Вестник СибГАУ, 2013. № 3. – С. 119-123.

4. Численное моделирование влияния припуска на величину остаточных напряжений в деталях летательных аппаратов после закалки / А.С. Бачурин, К.Н. Бобин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // Вестник СибГАУ, 2013. № 3. – С. 123-128.

5. Бачурин А.С., Математическая модель процесса закалки деталей/ Бачурин А.С., Осипов И.А., Гулидов А.Б., Бобин К.Н., Рынгач Н.А., Курлаев Н.В. //Авиационная промышленность – Москва, 2014. №3. С– 43

6. Оптимизация технологического припуска с учетом остаточных напряжений деталей / А. С. Бачурин, Д. М. Петров, К. Н. Бобин, Н. А. Рынгач, Н. В. Курлаев // *Авиационная промышленность*. - 2015. - № 2. - С. 1-4.

**в прочих изданиях –**

7. Bachurin A.S. Analysis of Residual Thermal Stresses in Composite Materials/ A.S. Bachurin // Graduate and Postgraduate students scientific conference «Siberian Innovative Technologies».- Novosibirsk: NSTU, 2011. – P. 10-11.

8. Бачурин А.С. Анализ остаточных термических напряжений в композиционном материале методом конечных элементов/ А.С. Бачурин, Е.Г. Подружин // Труды XII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона».- Новосибирск: НГТУ, 2011. – С. 493–498.

9. Бачурин А.С. Оценка точности решения нестационарных тепловых задач и расчет процесса закалки с постепенным погружением в закалочную среду методом конечных элементов/ А.С. Бачурин, Н.В. Курлаев, А.Ю. Слюняев // Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона».- Новосибирск: НГТУ, 2012. – С. 64-68

10. Бачурин А.С. Влияние технологического припуска на остаточные напряжения деталей самолета/ А.С. Бачурин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // VII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения».- Томск: ТПУ, 2013. – С. 279-280.

11. Гумбатова С.А. Рационализация технологического процесса изготовления переплета фонаря кабины самолёта SSJ-100/ С.А. Гумбатова, А.С. Бачурин, Н.В. Курлаев// VII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения».- Томск: ТПУ, 2013. – С. 281-282.

12. Osipov I. Numerical simulation of parts quenching deformation / I. Osipov, A. Bachurin, N. Kurlayev // *Applied Mechanics and Materials*. - 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 487-490

13. Pavlushenko N. Relationship between quenching deformations and machining allowance / N. Pavlushenko, A. Bachurin, N. Rynkach // *Applied Mechanics and Materials*. - 2015. – Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical

Engineering, EEM 2014. – P. 478-481. – DOI:  
10.4028/www.scientific.net/AMM.698.478

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав и заключения в совокупности изложенных на 104-х страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 58 наименований.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Министерства образования и науки РФ №7.822.2011.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

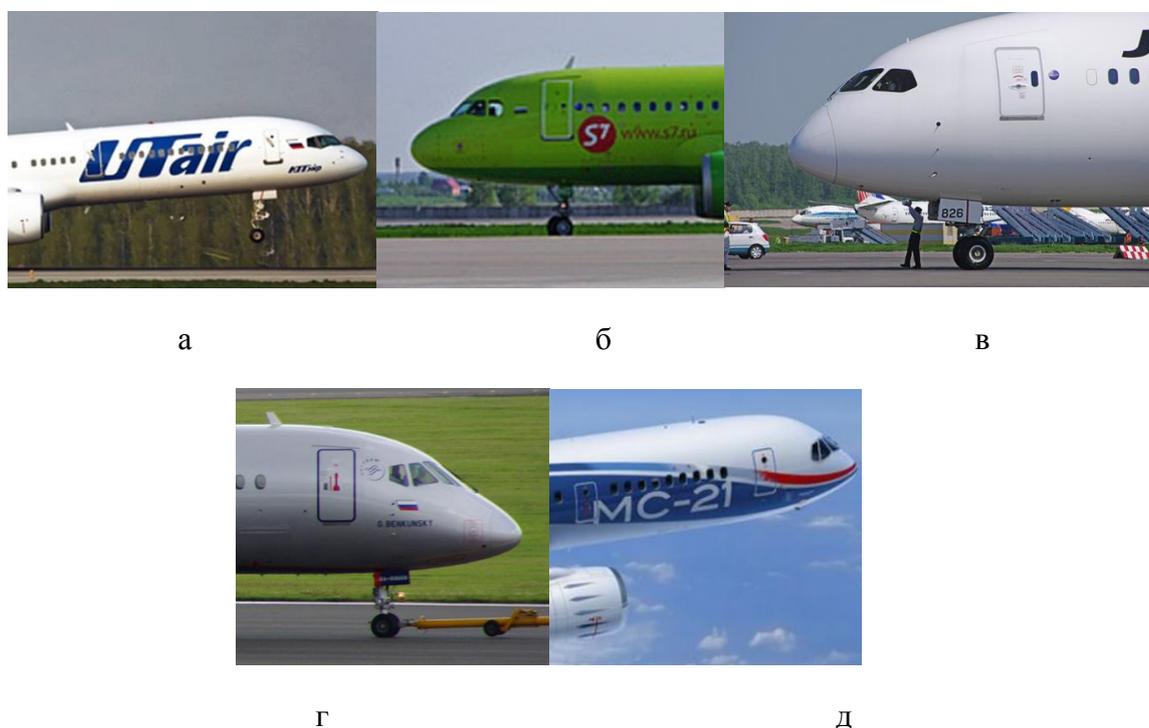
### 1.1 Переплёт фонаря как элемент конструкции ЛА

Кабина экипажа размещается в передней части фюзеляжа. Её размеры и компоновка зависят от состава экипажа. Форма носовой части, форма поперечных сечений фюзеляжа выбираются в период эскизного проектирования самолета с учетом минимального аэродинамического сопротивления, удобства для экипажа, размещения необходимого оборудования и т.п.

Требование минимального аэродинамического сопротивления продиктовано как снижением требуемой мощности для его преодоления, так и снижением аэродинамических нагрузок (которые приводят к увеличению массы конструкции ЛА) [1]. Так или иначе повышенное аэродинамическое сопротивление приводит к излишним затратам на техническую эксплуатацию ЛА, снижению рентабельности его использования. Аэродинамические силы, действующие на поверхность фюзеляжа в виде разряжения или давления, в отдельных местах (фонарь, носовая часть) могут достигать значительной величины –  $7000 \text{ кг/м}^2$ . Аэродинамические силы оказывают существенное влияние на местную прочность конструкции и практически не сказываются на работе конструкции в целом [2].

Аэродинамические обводы двойной кривизны, наиболее выгодные в аэродинамическом отношении, однако негативно сказываются на обзоре летчиков из-за оптических искажений. Поверхности одинарной кривизны дают меньше искажений, а наилучшими являются плоскости, не преломляющие свет. Обзор зависит не только от формы остекления, но и геометрических размеров поперечных сечений каркаса (рамы переплёта фонаря) – чем они меньше, тем лучше обзор. Также одна из боковых панелей фонаря должна быть открывающейся или сдвигающейся для переговоров на старте. Поверхности двойной кривизны затрудняют устройство направляющих для сдвига подвижной части фонаря назад и откидывания её в сторону [1].

Если сравнивать фонари самолётов, спроектированных до 1990-го года (рисунок 1а,б) и после (рисунок 1в,г), то можно заметить переход от плоского остекления к остеклению одинарной кривизны. При проектировании конструкторы максимально "вписывают" аэродинамические обводы фонаря кабины экипажа в обводы фюзеляжа, делая переход от носового обтекателя к фонарю и от фонаря к фюзеляжу максимально аэродинамически совершенным. Подобная тенденция сохраняется и для вновь проектируемых самолетов, таких как МС-21 (рисунок 1д).

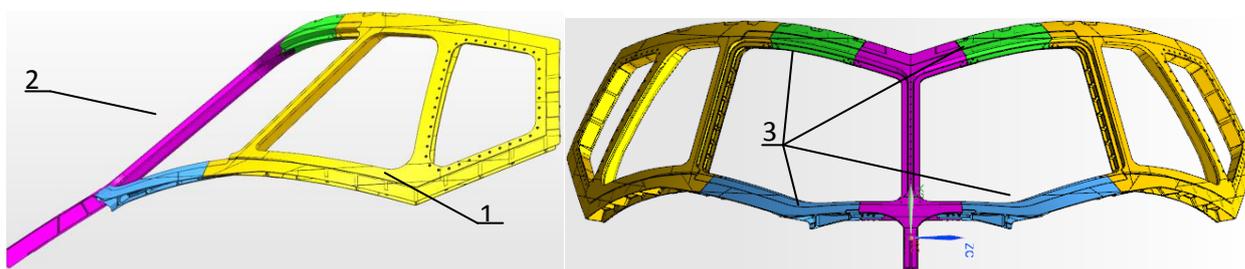


а) Airbus-320; б) Boeing-757-200; в) Boeing-787; г) SSJ-100; д) МС-21(проект)

Рисунок 1 – Фонари (кокпит) различных пассажирских самолётов разных периодов проектирования.

Применение подобных фонарей положительно сказывается на снижении аэродинамического сопротивления, а как следствие сокращению массы переплета фонаря (за счет снижения нагрузок) и потребной мощности для преодоления аэродинамического сопротивления, что в конечном итоге повышает экономичность ЛА. Однако, это приводит к повышенной геометрической

сложности рамы переплёта фонаря, и в случае применения большого количества крепежа выигрыш в массе может быть потерян. Применение монолитных конструкций снижает количество концентраторов напряжений, позволяет снизить вес на 10-20%, что оправдывает увеличение стоимости конструкции. Поэтому рамы стараются выполнять из минимального количества деталей. Это приводит к увеличению размеров единичной детали, так переплет фонаря самолетов семейства SSJ собирается из 2-х боковых рам, одной центральной стойки переплёта фонаря и 4-х балок (рисунок 2).



1) боковая рама переплёта; 2) центральная стойка; 3) балки переплёта

Рисунок 2 – Переплёт фонаря SSJ-100.

Несмотря на снижение нагрузок, за счет снижения аэродинамического сопротивления, фонари самолётов испытывают значительные нагрузки: нагрузки от набегающего потока (аэродинамические); от разности давления внутри кабины и за бортом; тепловые нагрузки (температура за бортом до  $-60^{\circ}\text{C}$ , внутри кабины  $+20^{\circ}\text{C}$ ; перегрузки. Повышенные требования прочности (коэффициент запаса прочности рамы переплета фонаря  $f=3$ ), аэродинамики, жесткости и т.д. диктуют необходимость высокой точности изготовления деталей переплета [3].

Производство крупногабаритных деталей большой геометрической сложности, (детали содержащие поверхности одинарной, двойной кривизны, множество подкрепляющих элементов и т.п.) с заданной точностью, представляет собой сложную техническую задачу. Требования к точности производства рамы переплета фонаря определяются требованиями установки стекол [4]. При установке стекол на самолет RRJ-100 в раму переплета фонаря необходимо

обеспечить зазоры между рамой и стеклом порядка 1-3мм (компенсационные зазоры А и Б, рисунок 3) и обеспечить прилегание к раме с зазором 0,3-2,3 мм (размер В, рисунок 3). Аналогичные требования предъявляются к зазорам по прилеганию форточек к переплёту рамы фонаря при запирании.

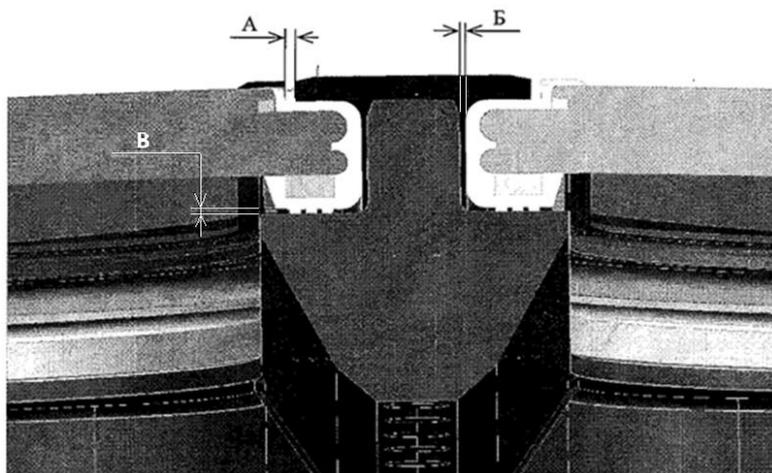


Рисунок 3 – Типовое сечение при установке стекол в переплёт фонаря.

Таким образом, к переплёту фонаря предъявляется набор требований, обуславливающий их высокую конструктивную сложность. Что неразрывно связано с высокой сложностью производства.

Повышенная сложность производства обусловлена: высокими требованиями точности изготовления; необходимостью применения крупногабаритных заготовок (характеризуемых значительными остаточными технологическими напряжениями, которые приводят к искажению геометрической формы детали после снятия припуска); погрешностью вносимой оборудованием производства; большим количеством технологических операций; и т.д. Однако неоспоримые преимущества применения деталей подобного класса стимулируют научно-технические изыскания в области технологии их производства.

## **1.2. Технологический процесс изготовления авиационных деталей на станках ЧПУ**

Производство летательных аппаратов является высокотехнологичным процессом, требующим обеспечения высочайшего качества каждого компонента оборудования и каждой детали конструкции планера [5]. Растущие требования в области обеспечения высокого ресурса планера ЛА ведут к увеличению количества деталей, выполненных при помощи станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Обработка на станках с ЧПУ производится при помощи резания. Обработка резанием является обработкой, заключающейся в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки. Образование поверхностей, согласно ГОСТ 3-1109-82, сопровождается деформированием и разрушением поверхностных слоев материала.

На данный момент количество деталей, изготавливаемых при помощи механической обработки резанием, неуклонно растет и составляет более 70% конструкции планера по весу. Однако, изготовление деталей при помощи механической обработки резанием является дорогостоящим и приводит к общему удорожанию изделия. Основные затраты приходятся на материал и машинное время (время работы станка с ЧПУ), на втором месте стоит стоимость инструмента.

Многие детали ЛА, выполненные из алюминиевых сплавов, подвергаются термической обработке. Термическая обработка заключается в изменении структуры и свойств материала заготовки вследствие тепловых воздействий [6].

Более массивные заготовки требуют большего времени для прогрева в закалочных печах, а иногда и специального оборудования [7]. Увеличение времени выдержки ведет к росту затрат на закалку и, как следствие, к росту себестоимости детали.

Стоимость механической обработки термообработанных деталей возрастает по сравнению с незакаленными. Это обусловлено возрастанием механических характеристик материала, которые приводят к снижению режимов резания,

ведущих к общему увеличению времени обработки на станке с ЧПУ. Также появляется необходимость использовать инструмент с улучшенными характеристиками износостойкости и температуростойкости, а значит и более дорогой.

Для уменьшения размеров заготовки, а также снижения затрат на обработку резанием, перед закалкой выполняют операцию обдирки. Она допускает использование менее точного оборудования, либо оборудования с ограниченным функционалом, а также позволяет снизить расходы на металлорежущий инструмент.

Введение обдирки, перед черновыми операциями обработки, позволяет поместить между ними термическую обработку. Таким образом, в операциях черновой обдирки снимаются излишки материала, не являющегося термоупрочненным, что облегчает обработку. При этом отсутствие высоких требований к точности и шероховатости поверхности на изготовление также снижают стоимость обработки. При обработке не закаленного материала применяются высокопроизводительные режимы резания и дешевый металлорежущий инструмент. Снижение толщины заготовки ведет к сокращению времени выдержки в печах.

В ходе операций обдирки необходимо оставить припуск. Для инженера, составляющего технологический процесс и управляющие программы (УП) для станка с ЧПУ, существуют рекомендации, касающиеся выбора припуска на деталь под закалку с последующей механической обработкой резанием. Первым наиболее подробно описал метод выбора припуска описал профессор Кован В.М. издав справочное пособие [8]. Как отмечает сам автор, методы определения припусков направлены прежде всего на экономию материала. Отметим, что автор рассматривает детали с достаточно высокой жесткостью, это подтверждает и сам описывая пространственные отклонения после окончательной обработки и рекомендует учитывать отклонения:

- 1) у черных заготовок (под первый технологический переход обработки резанием);

2) после предварительной и чистовой обработки лезвийным инструментом (под последующий технологический переход);

3) после термической обработки, даже если деформация ранее не имела места.

Наиболее подробное описание правки и изогнутости приводится для валов.

Подобное описание определения припуска приводит коллектив авторов под общей редакцией Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. расширяя метод на детали получаемые электроэрозионной обработкой и литьем [9]. Авторы Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г., Островский М.С. под общим руководством Тимирязева В.А. излагают современные методы, на 2004-й год, расчета припусков и межпереходных размеров при изготовлении корпусов, валов, шестерен, рычагов, ходовых винтов, шлицевых валов деталей с направляющими и т.п. [10]. Также книга содержит обширный нормативно- справочный материал, включая данные стандартов по отливкам, поковкам, штамповкам, сортовому прокату.

Авторы Харламов Г.А. и Тарапанов А.С. в общем случае разделяют метод определения припуска на:

– расчетно-аналитический метод;

и,

– опытно-статистический.

Расчетно-аналитический метод определения припусков на обработку, разработанный профессором Кован В.М. [8], базируется на анализе факторов, влияющих на припуски предшествующего и выполняемого переходов технологического процесса обработки поверхности. Значение припуска определяется методом дифференцированного расчета по элементам, составляющим припуск. Метод предусматривает расчет припусков по всем последовательно выполняемым технологическим переходам обработки данной поверхности детали, их суммирование для определения общего припуска на обработку поверхности и расчет промежуточных размеров, определяющих положение поверхности, и размеров заготовки. Расчетной величиной является минимальный припуск на обработку, достаточный для устранения на выполняемом переходе погрешностей обработки и дефектов поверхностного

слоя, полученных на предшествующем переходе, компенсации погрешностей, возникающих на выполняемом переходе. В общем случае все авторы определяют величину минимального промежуточного припуска из следующих уравнений:

– припуск на сторону при последовательной обработке противоположных или отдельно расположенных плоскостей [11];

$$z_{i\_min} = Rmax_{i-1} + h_{i-1} + \Delta_{\Sigma i-1} + \varepsilon_i; \quad (1)$$

– припуск на две стороны при параллельной обработке противоположных плоскостей

$$2z_{i\_min} = 2(Rmax_{i-1} + h_{i-1} + \Delta_{\Sigma i-1} + \varepsilon_i); \quad (2)$$

– припуск на диаметр при обработке наружных или внутренних поверхностей вращения

$$2z_{i\_min} = 2(Rmax_{i-1} + h_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma i-1}^2 \varepsilon_i^2}), \quad (3)$$

где  $Rmax_{i-1}$  – максимальная высота профиля шероховатости, полученная на предшествующем переходе;  $h_{i-1}$  – глубина дефектного слоя, достигнутая на предшествующем переходе;  $\Delta_{\Sigma i-1}$  – суммарное пространственное отклонение расположения обрабатываемой поверхности на предшествующем переходе;  $\varepsilon_i$  – погрешность установки заготовки при выполняемом переходе.

В общем случае рассчитанные таким образом припуски являются избыточными, как отмечает Кован В.М. Автор говорит, что при назначении припусков на обработку технолог обычно вынужден руководствоваться исключительно своим опытом, так как методы расчета припусков на обработку не учитывают с необходимой полнотой факторы, определяющие их величину. Еще менее надежные результаты получаются при определении припусков на обработку по эмпирическим формулам или по таблицам, содержащие готовые значения припусков [8].

Вариантов припуска существует множество, инженер вправе оставить припуск по эквидистанте (равномерный припуск), оставить напуск - упростить только некоторые геометрические элементы детали, либо упростить форму заготовки до

формы параллелепипеда. Таким образом, каждый инженер-технолог руководствуется либо собственным опытом, либо опытом коллег. Это не всегда является продуктивным, так как не позволяет однозначно установить необходимый и достаточный припуск. Зачастую инженеры-технологи стараются выбрать максимально возможный припуск, соответствующий максимальной толщине прокаливаемости того или иного материала, что, в свою очередь, увеличивает стоимость производства детали за счет роста затрат на термообработку и механическую обработку закаленной детали. Это обусловлено возникновением поводок заготовки в результате закалки и, следовательно, неписываемости детали в заготовку, что не позволит изготовить деталь.

В результате удаления слоёв материала, в ходе механической обработки, нарушается равновесное напряженное состояние заготовки, и после изготовления остаточные напряжения приводят к изменению геометрии детали [12]. Поэтому применяется ступенчатая обработка: то есть имеется множество управляющих программ с различным припуском на чистовую операцию, и производится «подборка» материала до тех пор, пока деталь не окажется в допуске. Применение данного метода значительно усложняет обработку, требует множества промежуточных операций контроля геометрии и ведет к общему увеличению времени и стоимости изготовления.

### **1.3. Обработка алюминиевых сплавов резанием и термообработка.**

В конструкции летательных аппаратов алюминий занимает большую массовую долю. При изготовлении деталей ЛА не применяется чистый алюминий, в качестве конструкционного материала применяют его сплавы. В настоящее время разработано множество сплавов [13].

В алюминиевые сплавы, для улучшения характеристик, вводят различные легирующие элементы, которые существенно изменяют его свойства, а иногда придают новые специфические свойства. Легированием достигается повышение прочности, твердости, жаропрочности и т.д. Однако введение легирующих элементов не только повышает необходимые характеристики, но и снижает

другие важные характеристики: электропроводность, во многих случаях ухудшается коррозионная стойкость, почти всегда повышается относительная плотность. Однако если наличие примесей железа и снижают коррозионную стойкость, то легирование марганцем позволяет несколько повысить коррозионную стойкость, тем самым снизить негативное влияние железа. Легирование магнием повышает коррозионную стойкость, если его не более 3%, и снижает относительную плотность, в виду меньшей плотности, чем у алюминия [13].

На обрабатываемость алюминиевых сплавов влияет химический состав и термическая обработка. Так легирование медью, магнием и цинком положительно сказывается на обрабатываемости резанием. А большое содержание кремния приводит к интенсивному изнашиванию режущего инструмента и снижает качество поверхности. Высокая теплопроводность алюминиевых сплавов благоприятствует использованию высокоскоростных методов обработки, однако их применение не всегда возможно [13].

Ввиду высокого коэффициента линейного расширения и невысокого модуля упругости, при обработке рекомендуется использование обильного охлаждения и минимального усилия в зажимных устройствах. По обрабатываемости алюминий и его сплавы можно разделить на три группы, данные о которых приведены в таблице 1 [13].

Таблица 1 – Классификация алюминия и алюминиевых сплавов по обрабатываемости резанием.

	Состояние сплава	Система сплавов	Марки сплавов
I группа	1. Алюминий чистый литой и деформируемый	Чистый алюминий литой Чистый алюминий деформированный	A99, A995, A99, A95, A85, A8, A7, A6, A5, AO, A, AE АДОО, АДО, АД1, АД

	2. Алюминиевые сплавы, термически неупрочняемые	Al-Mn Al-Mg	АМц, АМц1 АМг1, АМг2, АМг3, АМг4, АМг5, АМг6, АМг61, 1570
	3. Алюминиевые сплавы, термически упрочняемые в отожженном состоянии	Al-Mg-Si Al-Cu-Mg Al-Zn-Mg-Cu Al-Zn-Mg Al-Li-Mg Al-Li-Cu Al-Li-Mg-Cu Al-Li-Cu-Sc Al-Li-Cu-Mn-Cd Al-Cu-Mg-Ni-Fe Al-Cu-Mg-Si	АВ, АД31, АД33, АО35, Д1, Д16; Д19; 1161, 1163, 1151; ВД17, ВАД1 В93, В95, В96, В96Ц-1, В96Ц-3, 1953, 1973, АЦМ 1191, 1915, 1925, 1932, 1955, 1970 1420, 1421, 1423 1450, 1451 1430, 1440, 1441 1460 ВАД23 АК2, АК4, АК4-1, АК4-2 АК6, АК8
II группа	Алюминиевые сплавы, термически упрочняемые в закаленном и состаренном состоянии	Al-Mg-Si Al-Cu-Mg Al-Zn-Mg-Cu Al-Zn-Mg Al-Li-Mg Al-Li-Cu Al-Li-Mg-Cu Al-Li-Mg-Sc Al-Li-Cu-Mn-Cd Al-Cu-Mg-Ni-Fe Al-Cu-Mg-Si	АВ, АД31, АД33, АД35 Д1, Д16, Д19, 1161, 1163, 1151, ВД17, ВАД1 В93, В95, В96, В96Ц-1, В96Ц-3, 1933, 1973, АЦМ 1911, 1915, 1925, 1935, 1955, 1970 1420, 1421, 1423 1450, 1451 1430, 1440, 1441 1460 ВАД23 АК2, АК4, АК4-1, АК4-2 АК6, АК8

Алюминиевые сплавы обрабатываются на универсальных и специализированных станках, в том числе и на станках с числовым программным управлением.

Режущий инструмент для обработки алюминиевых сплавов изготавливается из быстрорежущей стали, твердых сплавов, синтетических сверхтвердых и керамических материалов. Рекомендуется применение природных и синтетических алмазов при обработке на станках с ЧПУ, обрабатывающих центрах.

Алюминиевые сплавы делятся на две группы обрабатываемости (таблица 1). Стоимость механической обработки термообработанных деталей выше, по сравнению с незакаленными. Это вызвано возрастанием механических характеристик материала после термической обработки, что приводит к снижению режимов резания. Произведя анализ таблиц 1 и 2, можно заметить, что в зависимости от группы обрабатываемости изменяются рекомендованные режимы резания.

Таблица 2 – Технологические параметры фрезерной обработки алюминиевых сплавов.

Параметры	Материал режущей части инструмента	Группа обрабатываемости (см табл. 1)		Примечание
		I	II	
Задний угол $\alpha$ , град; угол фаски по задней поверхности $\alpha_{\phi}$ , град	Быстрорежущие стали	12-18	10-6	Меньшие значения $\alpha$ – при черновом фрезеровании То же «
	Твердые сплавы [ $\alpha_{\phi} \approx (\alpha - 2)$ ]			
	Синтетические сверхтвердые материалы	12-8	10-6	
Передний угол $\gamma$ , град; Угол фаски по передней поверхности $\gamma_{\phi}$ , град	Быстрорежущие стали	30-25	25-20	Меньшие значения $\gamma$ – при черновом фрезеровании То же «
	Твердые сплавы [ $\gamma_{\phi} \approx (\gamma - 2)$ ]	25-20	20-15	
	Синтетические сверхтвердые материалы	5-8	5-8	
Угол наклона режущей	Быстрорежущие стали, твердые сплавы,	30-40	< 30	-

кромки $\lambda$ , град	синтетические сверхтвердые материалы			
Скорость резания $v$ , м/мин	Быстрорежущие стали Твердые сплавы Синтетические сверхтвёрдые материалы	300-600* <sup>1</sup> <1200* <sup>2</sup> <2500* <sup>1</sup> <3000* <sup>2</sup> <3000* <sup>2</sup>	150- 300* <sup>1</sup>  250- 800* <sup>2</sup> 300- 800* <sup>1</sup> 500- 1000* <sup>2</sup> <1500* <sup>2</sup>	При содержании Si>10% следует применять твердые сплавы и синтетические сверхтвердые материалы То же « « «
Подача на зуб фрезы S, мм/зуб	Быстрорежущие стали Твердые сплавы Синтетические сверхтвёрдые материалы	0,1-0,5* <sup>1</sup> 0,03-0,1* <sup>2</sup> 0,1-0,6* <sup>1</sup> 0,03-0,1* <sup>2</sup> 0,01-0,04* <sup>2</sup>	0,1-0,5* <sup>1</sup> 0,03- 0,1* <sup>2</sup>  0,01- 0,4* <sup>2</sup>	« « « « «
Глубина резания t, мм	Быстрорежущие стали Твердые сплавы Синтетические сверхтвёрдые материалы	<6* <sup>1</sup> < 0,5* <sup>2</sup> < 7* <sup>1</sup> < 0,5* <sup>2</sup> 0,05-0,3* <sup>2</sup>	<6* <sup>1</sup> < 0,5* <sup>2</sup> < 7* <sup>1</sup> < 0,5* <sup>2</sup> 0,05- 0,3* <sup>2</sup>	« « « « «
Число зубьев фрезы z, цилиндрической дисковой концевой	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, синтетические сверхтвердые материалы	Z=4+10 D=40+160мм Z=6+12при D=500+200мм Z=2+5при D=40+3мм	при	Резьбовые фрезы чаще имеют меньший шаг зубьев,

				фасонные фрезы обычно выполняются с одним ножом.
Фрезерные головки	Быстрорежущие стали Твердые сплавы	$z=3+16$ при $D=100+500$ мм $z=3+12$ при $D=100+500$ мм		-
Смазочно-охлаждающие жидкости	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, синтетические сверхтвердые материалы	Без смазки Укринол-1М* <sup>2</sup>	Укринол-1М* <sup>1</sup> , Укринол-1М* <sup>2</sup> , ОСМ-3	-
* <sup>1</sup> Черновое фрезерование * <sup>2</sup> Чистовое фрезерование				

Так для сплавов подвергнутым термической обработке рекомендованная скорость резания практически в два раза ниже. Также появляется необходимость использовать инструмент с улучшенными характеристиками износостойкости и температуростойкости, а значит и более дорогой.

Таким образом назначение завышенного межоперационного припуска приводит к увеличению стоимости изготовления не только за счет большего времени выдержки в термических печах, но и за счет увеличения машинного времени, увеличения затрат на режущий инструмент.

#### **1.4. Причины возникновения остаточных закалочных напряжений и деформаций, их влияние на последующие технологические операции**

Как известно, остаточными напряжениями называются напряжения, существующие в деталях при отсутствии внешних воздействий (силовых и температурных). Обычно эти напряжения остаются в деталях после процесса их изготовления.

Остаточные напряжения можно условно разделить на макронапряжения и микронапряжения. Их отличие состоит в скорости изменения напряжений по пространственной координате. Если в пределах размера зерна материала напряжения изменяются незначительно, то они могут быть отнесены к числу макронапряжений. Для таких напряжений вполне допустимо представление об изотропном материале. Обычные напряжения от внешних нагрузок относятся к макронапряжениям.

Микронапряжения претерпевают резкие изменения в пределах зерна. Они связаны с анизотропией кристаллов, ориентацией кристаллографических плоскостей, наличием различных фаз и т.д.

При оценке влияния остаточных напряжений на прочность и деформации деталей учитывается действие макроскопических напряжений. Влияние микронапряжений исследовано мало, так как неизвестен нормальный уровень этих напряжений и его изменение в связи с технологическими факторами; само распределение микронапряжений подчиняется статистическим закономерностям. Далее рассматриваются обычные остаточные напряжения.

Образование остаточных напряжений при различных технологических процессах происходит различным образом. В основе их возникновения обычно лежат необратимые объемные изменения в материале.

Одним из наиболее типичных процессов является возникновение остаточных напряжений в результате предварительной пластической деформации. Часто эта деформация получается при нагревании или охлаждении тела.

Процесс же закалки неминуемо связан с нагревом до значительных температур и последующим резким охлаждением. Так закалка алюминиевых сплавов требует нагрева до температур свыше  $500^{\circ}\text{C}$ , это непременно приводит к значительному термическому расширению тел. На рисунке 4 представлены формы тел до и после нагрева [7].

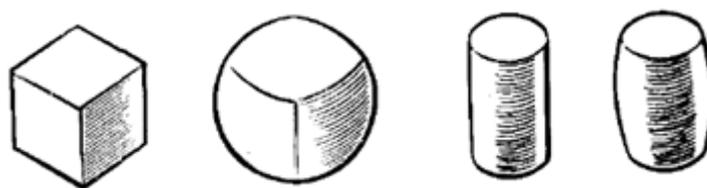


Рисунок 4– Изменение формы куба и цилиндра под действием нагрева.

Сам по себе нагрев хоть и сопровождается значительными деформациями, но в редких случаях приводит к образованию пластических деформаций [14], несмотря на то, что предел текучести в значительной мере снижается при высоких температурах.

Для образования пластических деформаций необходимо неравномерное поле перемещений. При закалке перемещения возникают под действием тепловых полей, а потому неравномерность поля перемещений может быть обусловлена только неравномерностью температурного поля. Способность той или иной детали к образованию остаточных закалочных напряжений и деформаций обуславливается различными факторами: прежде всего, физико-механическими характеристиками материала, а также формой заготовки, условиями охлаждения и температурой нагрева под закалку. Все эти факторы в различной мере влияют на конечные остаточные напряжения и деформации [14,15].

Однако закалка в качестве конечной технологической обработки в авиационной промышленности встречается редко. Чаще всего операция закалки проводится перед операциями обработки резанием. Обработка резанием является конечной операцией изготовления.

Достаточно высокие требования предъявляются к точности изготовления авиационных деталей. Точность изготовления авиационных деталей достигается различными способами. В случае обработки резанием, точность обеспечивается изготовлением деталей на высокоточном ЧПУ оборудовании с применением качественного инструмента и оснастки. Так или иначе, данные аспекты обеспечения точности изготовления рассмотрены широко и применяются повсеместно на авиационных производствах.

Однако на точность изготовления деталей оказывает значительное влияние и технологическая наследственность. В ходе обработки резанием, механическим путем, часть материала удаляется из заготовки, и формируется геометрия будущей детали. Удаление материала приводит к перераспределению внутренних напряжений. Нарушенное равновесие после перераспределения напряжений восстанавливается и приводит к изменению напряженно-деформированного состояния. Пока заготовка, с которой уже была удалена часть материала, остается в технологической оснастке, деформации могут составлять незначительную часть. Но для дальнейшего изготовления или, если данная операция обработки резанием была финишной, для использования в качестве сборочной единицы, деталь необходимо освободить от технологического оснащения. Это приводит к полному устранению внешних силовых факторов и деталь высвобождается. Освобожденная деталь принимает форму под действием перераспределенных внутренних напряжений, и зачастую полученная геометрия детали не соответствует требованиям, предъявляемым к детали, необходимой на сборочном производстве. Также внутренние напряжения могут быть настолько большими, что в процессе механической обработки перераспределение напряжений приводит к возрастающим нагрузкам на технологическую оснастку. Крепеж заготовок к оснастке обычно производится при помощи разъемных резьбовых соединений, которые под резко возросшей нагрузкой не выдерживают и разрушаются, чаще всего происходит срыв резьбы. Резкое высвобождение детали из оснастки и разрушенное соединение чреваты повреждением механообрабатывающего оборудования и нанесением травм рабочим.

Данные факторы, очевидно, демонстрируют необходимость учета технологической наследственности. Знание распределения напряжений может позволить организовывать снятие материала при обработке резанием с парированием перераспределения напряжений, уменьшая их. Но особо важной задачей представляется задача уменьшения остаточных закалочных (технологических) напряжений. Их уменьшение приведет к повышению качества

изготавливаемой детали – повышение точности, уменьшения внутренних напряжений и т.д.

### **1.5. Методы определения остаточных напряжений**

На практике, при написании управляющих программ для станков с числовым программным управлением, желательно учитывать наличие остаточных технологических напряжений, возникающих после операции закалки. Проведение операций обработки резанием с учетом остаточных напряжений в значительной мере усложняет процесс составления управляющих программ для станков с ЧПУ. В ряде случаев операции закалки предшествует одна или несколько операций механической обработки, в ходе которых изготавливают заготовку детали для закалки и образцы-свидетели. В связи с этим представляется логичным проводить формообразование заготовки средствами обработки резанием таким образом, чтобы обеспечить минимальные остаточные закалочные напряжения, возникающие при последующей термической обработке. Возможными способами реализации данной идеи могут послужить: а) варьирование припуска под закалку б) варьирование формы заготовки. Для того чтобы определить степень влияния тех или иных вариантов припуска под закалку или формы заготовки, необходимо прежде всего оценить величину остаточных напряжений, возникших в ходе закалки при варьировании данных параметров.

В общем случае для определения остаточных напряжений имеется два основных способа: экспериментальный и расчетный.

Экспериментальные методы получили широкое распространение для определения напряжений в изделиях из различных металлов. Все экспериментальные методы можно в свою очередь разделить на физические и механические [16].

Все механические способы определения предполагают полное или частичное разрушение исследуемого объекта и исследование возникающих при этом деформаций или перемещений, то есть осуществляется путём нарушения равновесного состояния. В случае неполного разрушения объекта исследования,

производится высверливание отверстий на поверхности, нарезки канавок и вырезки столбиков. При помощи высверливания и нанесения канавок измеряют деформацию оставшейся части поверхности детали. При вырезке столбиков определяют деформацию отделенной части. Возникшая при этом деформация регистрируется механическими тензометрами, тензорезисторами, по отпечаткам алмазной пирамиды, рентгеновской тензометрией и другими способами. Механические методы, в отличие от физических, позволяют получить распределение остаточных напряжений и по сечению.

Метод, заключающийся в нанесении канавок, предназначен для определения остаточных напряжений в поверхностном слое. Он основан на перераспределении напряжений из основных - в новые, вблизи канавок (концентраторов). Этот метод может быть использован и при производстве, так как является малоразрушительным. Глубина канавки обычно является незначительной по сравнению с припуском на закалку, и может быть удалена при последующей механической обработке.

Так профессор И.А. Биргер [16] систематизировал и обосновал механические методы определения остаточных напряжений в деталях наиболее распространенных форм: прутки, проволока, труба. Основным принципом определения остаточных напряжений механическими способами, установленный И.А. Биргером, состоит в том, что разрез и обнажение поверхности эквивалентны приложению к поверхности сечения остаточных напряжений обратного знака. В дальнейшем этот принцип был распространен на случай нахождения остаточных напряжений при наращивании тела.

Механические способы определения остаточных напряжений можно разделить на силовые и деформационные. Силовые методы основаны на том, что после удаления части материала, деталь с помощью внешней нагрузки возвращается в исходное положение. Предполагается, что полученная нагрузка равносильна действию остаточных напряжений, которые были в удаленной части. Деформационные методы заключаются в измерении перемещений или деформаций после отделения части детали.

Для деталей основных геометрических форм, таких как цилиндр, пластина, диск, труба, шар и т.д. выведены расчетные формулы для определения остаточных напряжений. В работах [16,17] описаны некоторые экспериментальные методы определения остаточных напряжений. Рассматриваются такие методы как: метод Гейна-Бауэра, метод Андерсена-Фальмана, метод Давиденкова, метод Закса и т.д.

Тем не менее, все вышеописанные методы, как механический, так и физический, имеют существенные ограничения и являются достаточно затратными. Одним из основных недостатков является необходимость проведения натуральных испытаний, что не дает возможности определить остаточные напряжения до создания изделия. Это является особенно важным при отработке технологии производства, когда встает вопрос об остаточных технологических напряжениях. И при анализе подобных ситуаций важным является как конечное распределение, так и развитие напряжений во времени.

Дать представление о качественном распределении и о величине остаточных напряжений, как в конце технологических операций, так и в их процессе, может математическое моделирование. Математическое моделирование основывается на решении краевых задач математической физики и может быть разделено на аналитический и численный методы [18,19]. Каждое новое решение той или иной задачи аналитическим методом является достаточно большой научной проблемой. Аналитическое математическое моделирование, обладая несомненным преимуществом в точности решения, имеет и существенный недостаток – высочайшую трудность решения [20]. Высокая же степень геометрической сложности деталей ЛА и нелинейное изменение характеристик материала в ходе закалки дополнительно значительно усложняют её для аналитического описания.

С целью получения представления о развитии, конечном распределении и величине напряжений после закалки возможно использование численных методов. Современные конечно-элементные пакеты представляют для пользователя широчайшие возможности по решению различных задач, в том числе задач термоупругопластичности. Современные конечно-элементные

пакеты, такие как ANSYS, позволяют получать необходимую конечно-элементную сетку на 3D моделях практически любой сложности [21]. Таким образом, применение конечно-элементных пакетов может обеспечить возможность численного эксперимента по проведению закалки, с широким спектром вариантов, как припуска, так и формы заготовки. По результатам численных экспериментов появится возможность оценить влияние технологических параметров на остаточные напряжения, и путем их варьирования в допустимых пределах получить и выработать рекомендации.

### **1.6. Вывод по главе, цель и задачи исследования**

Современное состояние технологических процессов производства деталей ЛА требует учета всё больших факторов при изготовлении деталей самолетов. А ввиду увеличивающегося количества крупногабаритных деталей, среди которых и детали двойной кривизны с выходом на аэродинамические обводы (теоретический контур), особенно остро встает вопрос обеспечения точности их изготовления. Влияние технологической наследственности на конечное качество детали известно давно, игнорирование же этого аспекта существенно снижает количество годных деталей на производстве и ведет к убыткам. Таким образом, встает вопрос об учете разносторонних операций производства, и их учет с целью повышения качества деталей ЛА.

Одним из подобных факторов, влияющих на качество деталей, становится выбор величины припуска с учетом таких особенностей как: обеспечение технологичности при производстве, снижение остаточных напряжений после операций закалки, обеспечение вписываемости детали после закалки на этапе обработки резанием, времени выдержки в закалочной печи и т.д.

Таким образом, при механической обработке, после термической, авиационных деталей сложной геометрии задача определения припуска сводится к выбору припуска позволяющего получить минимальные остаточные напряжения, в тоже время обеспечивающего вписываемость детали в заготовку.

**Цель работы.** Повышение точности изготовления крупногабаритных фрезерованных авиационных деталей, заготовки которых подвергаются механической обработке после закалки, с наименьшими издержками технологического процесса.

**Основные задачи исследования.**

1. Исследовать основные факторы процесса теплового нагружения, влияющие на возникновение остаточных деформаций при закалке. Определить необходимую и достаточную модель процесса закалки для численного моделирования. Исследовать влияние процессов термической обработки на последующие технологические операции изготовления авиационных деталей. Определить мероприятия по снижению остаточных напряжений.

2. Экспериментально исследовать возникающие при закалке деформации детали летательных аппаратов. Оценить достоверность результатов численного моделирования.

3. Разработать технологические рекомендации по снижению остаточных закалочных деформаций деталей, подвергаемых последующей механической обработке. Осуществить внедрение разработанных методик на авиационном предприятии.

## **ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ**

### **2.1. Общие принципы моделирования и упрощающие положения**

Термоупругость всегда остается областью пристального внимания инженеров и ученых. Это связано с важными проблемами, требующими решения при разработке новых конструкций двигателей, высокоскоростных самолетов, реакторов и т.д. Ведь в результате подвода тепла в двигателе, реакторе или при аэродинамическом нагреве высокоскоростного самолета элементы конструкции работают в условиях неравномерного, а порой и нестационарного нагрева. При этом изменяются физико-механические свойства материалов и возникают

градиенты температуры, сопровождающиеся неодинаковым тепловым расширением отдельных частей конструкции.

Без сомнения, решение данных проблем является важной задачей, однако, термоупругость не ограничивается только конструкторскими вопросами. Достаточно важными и интересными для решения представляются технологические задачи. Ведь ни для кого не секрет, что современное производство не может обходиться без таких технологических операций, как закалка, горячее формообразование (штамповка/ковка/прокат) и др. В процессе данных операций физико-механические свойства материала могут меняться в широких пределах, а в таких процессах как закалка еще и в короткий промежуток времени.

При этом, после данных технологических операций, представляют готовый продукт и потому в дальнейшем проходят множество различных этапов производства, таких как обработка резанием и др.

Поэтому важно и необходимо иметь представление не только о полученных механических свойствах закаленных заготовок, но и знать распределение остаточных напряжений.

Знание величины и характера распределения остаточных напряжений необходимо для учета в будущих технологических операциях. Остаточные напряжения могут вызвать появление трещин и разрушение детали, выполненной из материалов с повышенной хрупкостью, или привести к снижению ресурса детали.

Некоторые материалы при быстром появлении напряжений, обусловленном действием резкого градиента нестационарного температурного поля, становятся хрупкими и не выдерживают теплового удара, что характерно для технологического процесса закалки.

В результате действия тепловых напряжений может возникнуть пластическая деформация, ведущая к полному или прогрессирующему разрушению. Также, избыточная деформация заготовок для механообрабатывающего производства может их сделать непригодными для вписывания детали в заготовку или

установке в приспособление. Удаление материала при механической обработке приведет к перераспределению напряжений уже готовой детали, тем самым изменяя ее геометрические параметры, которые могут оказаться не отвечающими конструкторской документации.

В ходе закалки в материале непрерывно происходят термоупругопластические процессы. Они связаны с нагревом и последующим быстрым охлаждением, сопровождаемые непрерывным процессом нелинейного изменения характеристик материала. В общем случае, в произвольной области, нахождение решения по определению окончательной геометрии детали представляет собой сложную проблему.

Для определения остаточных термических напряжений и деформаций, возникающих при закалке, необходимо решить сопряженную задачу. Аналитическое решение данной задачи для деталей ЛА сложной геометрической формы не представляется возможным, однако реализуемо средствами численного анализа.

Задача моделирования закалки, в общем случае, является связанной задачей, однако в виду малости скорости распространения тепловых волн в материале, по сравнению со скоростью звука, и незначительного изменения площади теплообмена, задачу закалки можно разделить на две независимые задачи: 1) тепловая задача 2) структурная задача. Таким образом, необходимо первоначально получить, распределение тепловых полей во времени и передать их, в качестве нагрузки в структурный расчет.

Для моделирования процесса закалки первоначально необходимо получить распределение температурных полей во время процесса охлаждения. При нахождении распределения температурных полей в процессе охлаждения начальным распределением температуры можно пренебречь, в виду малости реальной разности температуры в различных точках заготовки (печи в термических цехах способны поддерживать температуру в рабочей зоне с точностью до одного градуса Цельсия). Учет же температурной зависимости таких характеристик как истинная теплоемкость и коэффициент теплообмена с внешней

средой, очевидно, необходим ввиду изменения данных параметров в процессе закалки [22]. Таким образом, решение тепловой задачи необходимо производить в нелинейной нестационарной постановке [23].

Влияние среды и свойств тела можно характеризовать числом Био ( $Bi = \alpha R / \lambda$ ), которое определяет отношение внутреннего и внешнего тепловых сопротивлений [24]. При анализе начальных условий выделяют две стадии процесса охлаждения (нагревания). В первой, начальной, стадии неупорядоченного (иррегулярного) режима температурное поле в значительной степени определяется особенностями начального распределения температуры [25]. Во второй стадии, которая наступает при числе Фурье ( $Fo = at / R^2 \geq 0,3$ ), начальное распределение уже не влияет на характер изменения температурного поля, и распределение температуры во времени для всех точек тела изменяется по экспоненциальному закону.

Таким образом, задача об охлаждении тела произвольной формы дополнительно усложняется. Аналитические же решения, для задачи об охлаждении, найдены лишь для простых тел таких, как пластина, шар цилиндр и описаны в работах [26, 27].

Попытка аналитически решить задачу охлаждения для тел произвольной формы была реализована в теории регулярного теплового режима [28]. Согласно ей тепловой процесс разбивается на две стадии: стадию иррегулярного и стадию регулярного режима. В регулярном режиме были определены "связи, существующие между темпом охлаждения, с одной стороны, и физическими свойствами тела, его формой, размерами и условиями охлаждения – с другой" [29]. Однако создатель теории столкнулся со сложными проблемами в процессе описания иррегулярного режима: "...о составных телах и говорить нечего...- дело, очевидно, безнадежное" [29].

При решении нестационарной тепловой задачи методом конечных элементов [30,31] в ПО ANSYS в общем виде решается уравнение:

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(t, T)\} \quad (4)$$

где  $t$  время,  $\{T\}$  температурное поле,  $[C]$  матрица удельной теплоемкости,  $[K]$  матрица теплопроводности,  $\{Q\}$  вектор скорости генерации тепла в системе.

После получения результатов теплового анализа изменяющееся во времени тепловое поле передаётся, в качестве нагрузки, в структурный анализ, для определения напряжений и деформаций, возникающих в результате первоначального нагрева и последующего неравномерного охлаждения [32–34].

В ходе закалки в материале непрерывно происходят термоупругопластические процессы, связанные с нагревом и последующим охлаждением, сопровождаемые непрерывным процессом нелинейного изменения характеристик материала [35]. Термоупругопластические процессы, происходящие при закалке, в общем случае характеризуются обобщенной математической моделью, для которой деформация определяется как [35]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^B + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{ph} + \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^c \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – тензор полной деформации;  $\varepsilon_{ij}^e$  – упругая деформация;  $\varepsilon_{ij}^p$  – пластическая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{th}$  – тепловая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{ph}$  – деформация фазового превращения;  $\varepsilon_{ij}^c$  – деформация ползучести. Ввиду кратковременности процесса закалки ползучесть не вносит существенного вклада в величину полной деформации и, поэтому, этим членом выражения можно пренебречь [36]. Авиационные детали изготавливаются в основном из алюминиевых сплавов. Так закалка АК6 происходит без полиморфного превращения, следовательно, можно не учитывать энергию фазового превращения [37].

Для решения задачи упругопластического деформирования под действием тепловых полей также применялся программный продукт ANSYS. В данном ПО (программное обеспечение) в качестве модели упругопластичности [38] использована теория течения для материала с билинейным изотропным упрочнением, для которого справедливы уравнения Прандтля-Рейсса и условия пластичности Губера-Мизеса:

$$de_{ik} = \frac{dS_{ik}}{2G} + \frac{3d\bar{\varepsilon}_u^p}{2\sigma_u} S_{ik}, \quad \sigma_u = \sqrt{\frac{3S_{ik}S_{ik}}{2}} = \Phi \left( \int d\bar{\varepsilon}_u^p \right) \quad (6)$$

где  $S_{ik}, e_{ik}$  – компоненты девиаторов напряжений и деформаций,  $\sigma_u$  – интенсивность нормальных напряжений,  $d\bar{\varepsilon}_u^p$  – интенсивность приращения пластических деформаций,  $G$  – модуль сдвига. Экспериментальная зависимость между напряжениями и деформациями аппроксимируется билинейным представлением с двумя модулями:  $E$  (упругий модуль) и  $E_p$  (пластичный модуль).

Численное решение тепловой задачи выполнялось в программном продукте ANSYS, с использованием типа анализа – "TransientThermal". Решение структурной задачи выполнялось в квазистатической постановке с использованием типа анализа – "StaticStructural" [39, 40].

## 2.2. Настройки конечно-элементного решения и макросы

В ходе решения любой задачи методом конечных элементов неизбежно встает вопрос о точности того или иного решения и выявления параметров, влияющих на его конечную точность. Результаты сравнения решения тепловой задачи в ПО ANSYS с аналитическим представлено в [41]. Наибольшее влияние на точность решения тепловой нестационарной задачи оказывает размер шага по времени, что объясняется процессом быстрого охлаждения тела.

В тепловом анализе в ПО ANSYS по умолчанию используется параметр интегрирования по времени  $\theta=0,5$ , что соответствует методу Кранка-Николсона. Расчет тепловых полей в ходе закалки, включающий учет сильных нелинейностей поведения системы, иногда приводит к решению, имеющему колебательный характер, при применении  $\theta=0,5$ . В таких случаях рекомендуется задавать значение  $\theta=1$ , что соответствует обратному методу Эйлера, при этом колебательный характер решения полностью исчезает. В общем случае использование значения  $\theta=1$ , вместо  $\theta=1/2$ , требует, для достижения одинаковой точности, более мелкого шага по времени [42].

Таким образом, выбор соответствующего шага интегрирования по времени является важным моментом: величина шага определяет точность результатов [42]. При выборе шага для моделирования закалки руководствуемся перечисленными выше соображениями (таблица 3).

Таблица 3 – Принципы выбора шага интегрирования.

Основание для выбора шага	Величина шага
Наличие мелкой сетки элементов	– более мелкий шаг
Существенные нелинейности	– более мелкий шаг
Слабые нестационарные эффекты	– более крупный шаг
Естественная конвекция (малые значения)	– более крупный шаг
Быстрое изменение нагрузок во времени	– более мелкий шаг

Надежная (или минимальная) величина шага по времени может быть назначена на основе критериев *Фурье* и *Био* [42]:

$$Fo = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta)^2}, Bi = \frac{h \Delta}{\lambda} \quad (7)$$

где  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$  – типичные значения теплофизических характеристик материалов для рассматриваемой задачи;  $\Delta$  – средний размер элемента;  $h$  – коэффициент теплопередачи (при наличии конвекции);  $\Delta t$  – величина шага по времени.

Если исходить из учета исключительно эффектов теплопроводности, то для оценки величины шага по времени можно использовать соотношение (8).

$$Fo \cong \beta \quad (8)$$

Для граничных условий с конвекцией – соотношение (9):

$$Fo Bi \cong \beta, \quad (9)$$

где  $\beta$  – масштабный коэффициент с типичными значениями от 1 до 100. Соответствующая оценка для шага по времени будет [42]:

$$\Delta t \cong \beta \frac{\rho c (\Delta)^2}{k} \quad (10)$$

и

$$\Delta t \cong \beta \frac{\rho c (\Delta)^2}{h} \quad (11)$$

Таким образом, подход к выбору шага по времени заключается в следующем:

- вычисляется шаг по времени с использованием условия  $\beta \leq 1$ ;
- полученное значение используется как начальный размер шага по времени;
- активизируется автоматический выбор шага для получения решения.

При использовании этого метода величина шага по времени будет достаточно малой для получения сходящегося решения, а процедура автоматического выбора шага скорректирует его в случае необходимости [42].

Приведенные оценки являются весьма консервативными (в частности, при  $\beta \leq 1$ ), т.е. заведомо надежными.

Соображения для оценки шага по времени основываются на средней длине теплопроводящего элемента, средних значениях свойств материалов и среднем значении коэффициента теплопередачи конвекцией. Однако при выборе величины шага должны также учитываться и другие эффекты: теплопередача излучением, многообразие свойств материалов, изменение приложенной тепловой нагрузки, ожидаемая точность решения.

Для проверки изложенных соображений была проведена серия численных экспериментов. Численное решение задачи было выполнено в программном комплексе ANSYS с использованием анализа "TransientThermal". Для построения сетки использовался 8-ми узловой двумерный тепловой твердотельный конечный элемент – PLANE77. PLANE77 8-узловой 2-D элемент это плоская или осесимметричная поверхность (рисунок 5), степень свободы – температура [43].

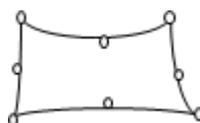


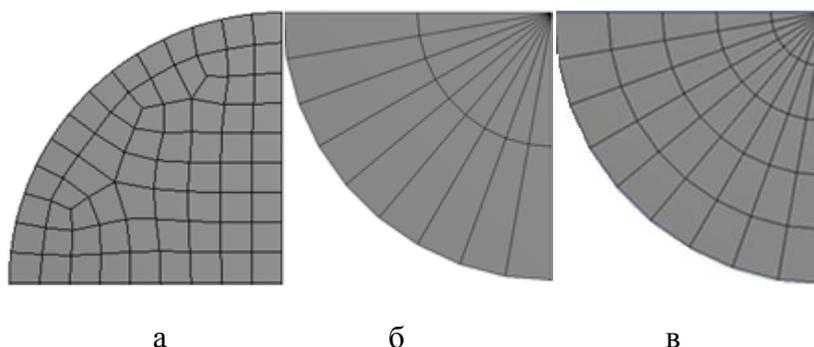
Рисунок 5– 2D 8-ми узловая тепловая поверхность PLANE77.

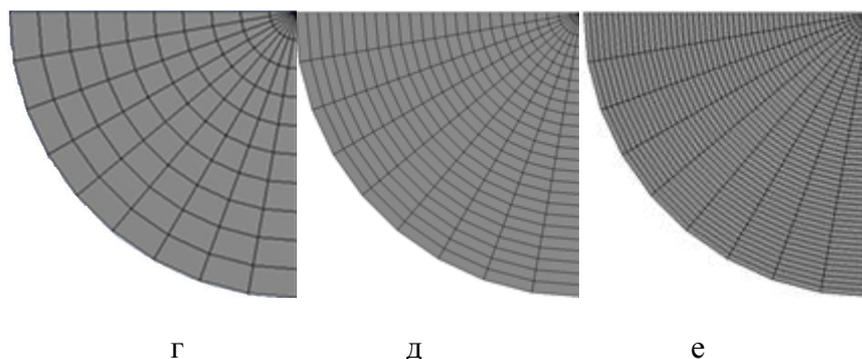
Оценка точности численного решения, полученного на основе метода конечных элементов, проводилась путем сравнения результатов с точным решением нестационарной задачи охлаждения бесконечно длинного цилиндра. В качестве граничных условий на границе тела были поставлены условия третьего рода. Начальное распределение – постоянная температура тела.

**Описание задачи:** диаметр цилиндра  $d=50\text{мм}$ , удельная теплоемкость  $c=875\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{°C})$ , теплопроводность  $\lambda=114\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$ , плотность  $\rho=2770\text{кг}/\text{м}^3$ , коэффициент конвективной теплоотдачи  $a=11400\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ , начальная температура  $500\text{°C}$ , температура закалочной среды  $20\text{°C}$ .

Для решения задачи аналитическим методом была написана программа в ПО Mathcad, реализующая известное аналитическое решение о охлаждении бесконечного цилиндра с граничными условиями третьего рода на поверхности. В качестве результатов решения были получены распределения температуры в различные моменты времени.

Численное решение задачи было выполнено в программном комплексе ANSYS. Для построения сетки использовался 8-ми узловой двумерный тепловой твердотельный конечный элемент (PLANE77) [43]. Из всех решений выбирались распределение температуры на внешней поверхности цилиндра и в его центре. Была выполнена серия численных экспериментов, в которых варьировались количество конечных элементов сетки вдоль радиального направления и шаг по времени. Численные решения выполнены для различных сочетаний шага по времени и размера сетки (рисунок б).





а) сетка «по умолчанию» б) 2 элемента в радиальном направлении в) 5 элемента в радиальном направлении г) 10 элемента в радиальном направлении д) 25 элемента в радиальном направлении е) 50 элемента в радиальном направлении.

Рисунок 6 – Варианты сетки.

В качестве контрольных точек, для сравнения были выбраны: а) центр цилиндра; б) поверхность цилиндра. Для оценки производился расчет относительной погрешности, результаты представлены в таблице 4 Таблица 4.

Таблица 4 – Погрешность для различных вариантов размерностей сетки и временного шага.

№	Шаг по времени (сек)	Кол-во элементов по радиусу	Максимальная наблюдаемая погрешность, %
1	0.005	5	0.057
2	0.01	5	0.11
3	0.1	5	1.03
4	0.5	5	5.16
5	1	5	10.32
6	2	5	21.63
8	По умолчанию	5	20.8
9	По умолчанию	По умолчанию	20.84
10	0.1	По умолчанию	1.055
11	0.1	50	1.031
12	0.1	25	1.031
13	0.1	10	1.031
14	0.1	2	1.091

Значение "По умолчанию" в таблице означает, что данный параметр выбирался программой, без применения дополнительных настроек.

Как видно из таблицы 4, наибольшее влияние на точность решения оказывает размер шага по времени, что объясняется процессом быстрого остывания тела. Выбранная размерность сетки является оптимальной. Максимальные значения абсолютной погрешности приходились на 13-15с исследуемого процесса. Целесообразным представляется снижение шага по времени в начальный период расчета, а в остальные моменты времени шаг можно оставить прежним, для экономии расчетного времени. Отметим, что значения шага по времени и размерности сетки, предлагаемые по умолчанию программным комплексом, дают большую погрешность численного решения и не могут применяться для расчетов реальных задач.

При решении задач моделирования охлаждения тел в ходе закалки, нет необходимости использовать постоянный шаг по времени на всем временном промежутке, соответствующем шагу. С практической точки зрения имеет смысл в первоначальный момент времени, когда изменение температуры  $\Delta t$  максимально, назначать наиболее мелкий шаг (рисунок 7). По мере же охлаждения возможно увеличение шага, либо применение автоматического шага.

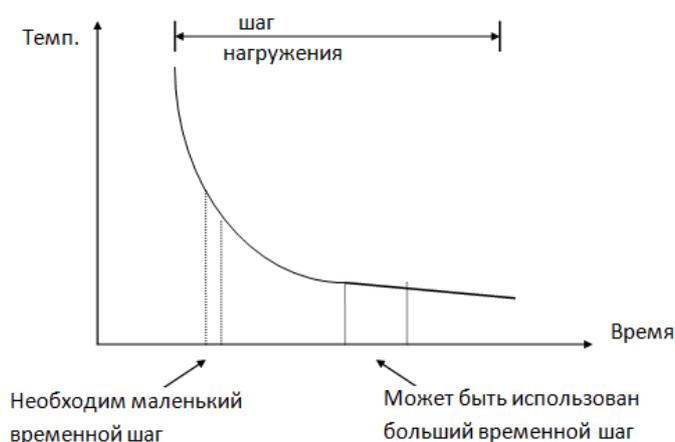


Рисунок 7 – Изменение шага интегрирования в ходе теплового анализа.

Для назначения начального шага по времени, в начале процесса охлаждения, когда изменение температуры максимально, использовалось соотношение [44]:

$$ITS = \frac{\Delta^2}{4 \alpha} \quad (12)$$

где  $\Delta^2$  – длина конечного элемента в направлении наибольшего температурного градиента,  $\alpha$  – температуропроводность.

Таким образом, разбиение на конечные элементы производилось с учетом необходимого шага по времени. Для экономии вычислительных средств наиболее мелкая сетка конечных элементов создавалась на поверхности, укрупняясь по направлению к центру тела [44].

Отметим, что значения шага по времени и размерности сетки, предлагаемые по умолчанию программным комплексом, дают большую погрешность численного решения и не могут применяться для расчетов реальных задач.

Для реализации приложения нагрузки в тепловом анализе использовались граничные условия 3-го рода. Как известно коэффициент теплоотдачи значительно меняется в зависимости от температуры поверхности теплообмена. Поэтому, в ходе решения тепловой задачи необходимо учитывать данную особенность. ПО ANSYS поддерживает возможность задания температурозависимого коэффициента теплообмена, что реализуется стандартными средствами.

Закалка алюминиевых сплавов зачастую требует обеспечения достаточно высоких скоростей охлаждения. Наиболее распространенной является закалка в холодную воду (25°C). В качестве исходного, для расчетов нестационарных задач закалочного охлаждения методом конечных элементов, принималась зависимость, представленная на рисунке 8, взята из источника [45].

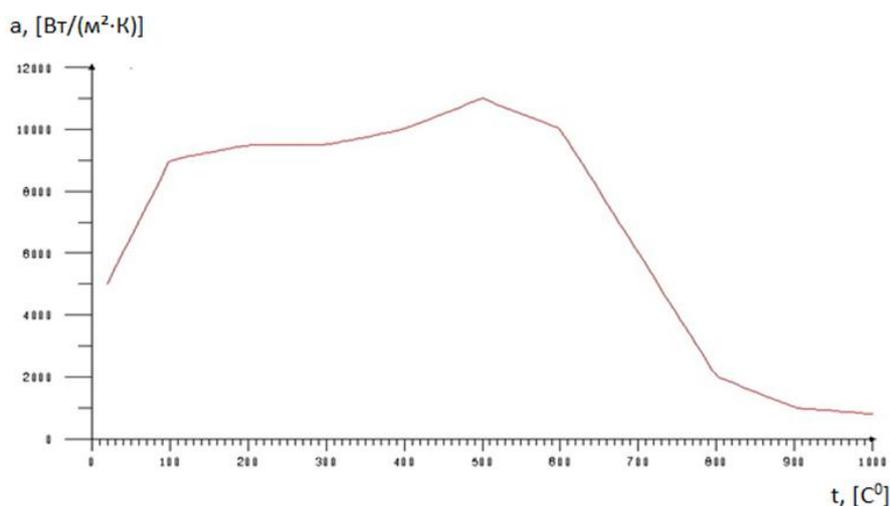


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента теплообмена от температуры поверхности теплообмена.

При закалке практически невозможно реализовать мгновенное равномерное охлаждение всех поверхностей детали. Это обусловлено, прежде всего, необходимостью прохождения деталью этапа погружения в закалочную среду. Райцес В.Б. указывает на связь между погружением детали в закалочную среду и итоговыми остаточными деформациями в детали после закалки. Для учета эффекта погружения детали в закалочную среду необходимо реализовать приложения коэффициента теплообмена не только в зависимости от температуры, но и в зависимости от времени и координаты, вдоль которой происходит погружение. Стандартной возможности реализации в ПО ANSYS нет, но возможно написание макроса изменяющего параметры теплообмена в процессе решения тепловой задачи закалки.

Реализация приложения граничных условий с учетом зависимости коэффициента теплообмена от температуры, времени, и координаты осуществлялось с помощью макроса написанного на стандартном языке ANSYS – APDL. Данная задача реализовывалась с помощью задания коэффициента теплообмена в виде 4-х мерной таблицы [46, 47], при помощи команды:

"DIM,ТЕПЛООБМЕН,tab4,41,41,7,,TIME,Y,TEMP",

где DIM – параметр APDL, ТЕПЛООБМЕН – название таблицы, tab4 – размерность таблицы (соответствует 4-х мерной таблице), TIME – параметр APDL

соответствующий времени (определяет зависимость аргумента от данного параметра, в данном случае 41 переменная параметра времени), Y – параметр APDL соответствующий оси Y (определяет зависимость аргумента от пространственного положения, соответствует размерности времени в течении которого меняется координата погружения Y), TEMP – параметр APDL соответствующий времени (определяет зависимость аргумента от температуры границы теплообмена, является аппроксимацией кривой представленной на рисунке 8, соответствует 7-ми точкам кривой).

Приложение нагрузки на поверхность теплообмена осуществлялось посредством именованного выбора командой [46,48]:

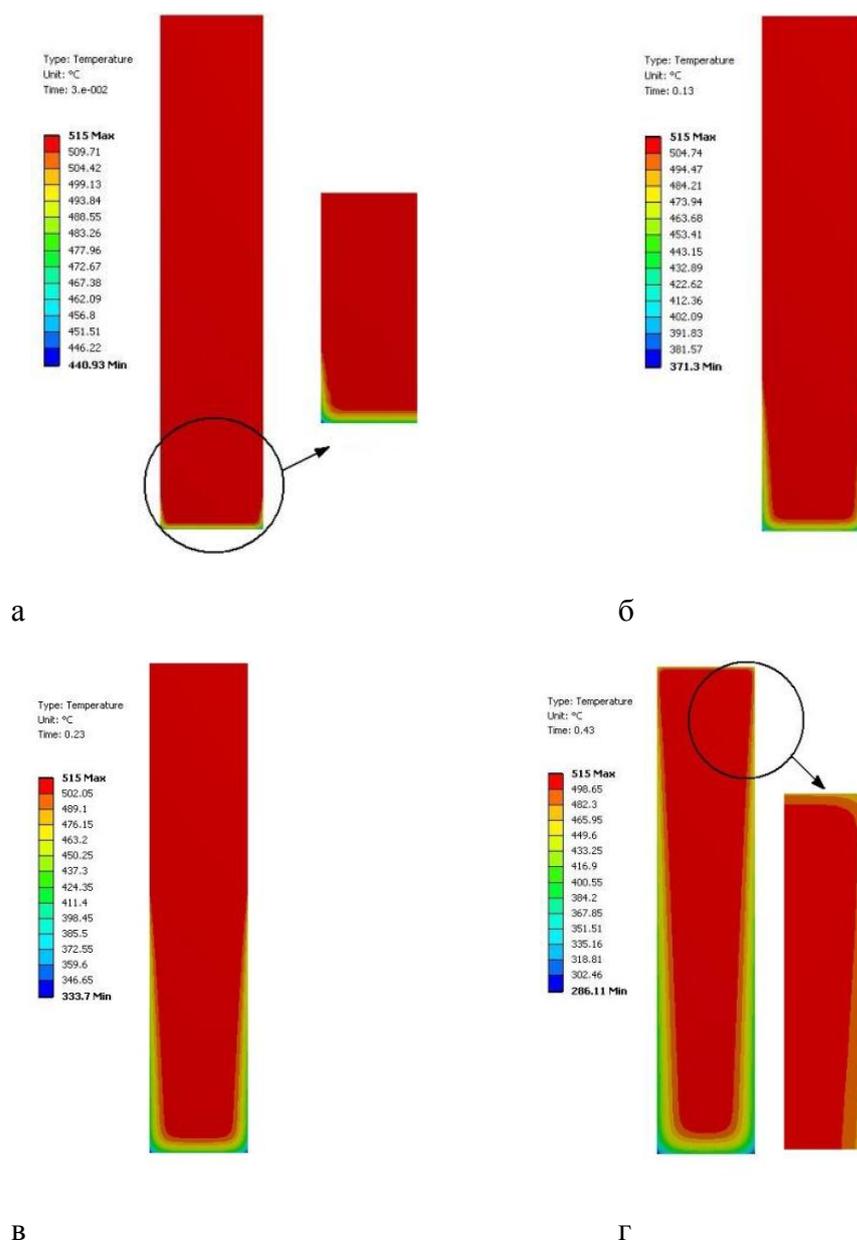
```
"cmsel,s,GRANICA";"SF,all,CONV,% ТЕРПООБМЕН %,25".
```

То есть выбирается (cmsel) новая (s) область с именем "GRANICA" и назначается нагрузка (SF) на область, тип нагрузки (CONV) – коэффициент теплообмена, определяемый таблицей "ТЕРПООБМЕН", температура среды 25°C. В ходе расчетов размер таблицы, соответствующей времени погружения или величине погружения вдоль оси, варьировался в зависимости от размера тела и скорости погружения.

### **2.3. Учет процесса погружения в закалочную среду**

Как было сказано ранее, в ходе закалки практически невозможно реализовать мгновенное одновременное начало охлаждения детали по всем сторонам. Особенно большие разницы температур в теле детали могут возникать при больших габаритах детали, так как скорость погружения в закалочную ванну обычно не превышает скорости 2 м/с. Для оценки необходимости применения макроса позволяющего учитывать процесс погружения, в виду большой трудоемкости его составления, было проведено предварительное моделирование только тепловой задачи. Для проведения математического моделирования процесса охлаждения при закалке с учетом погружения использовался макрос, описанный в п.2.2.

В качестве объекта моделирования был выбран цилиндр с погружением вдоль оси вращения. Диаметр цилиндра составлял 50мм, длина – 250мм. Теплофизические свойства принимались свойственные алюминиевому сплаву АК6, коэффициент теплообмена с закалочной средой согласно рисунку 8. Время погружения принималось равным 0,41 секунды. Начальное распределение температуры – равномерное, температура цилиндра 515°C. На рисунке 9 показано распределение температуры в цилиндре в различные моменты времени.



а)0,03с; б)0,13с; в)0,23с; г)0,43с

Рисунок 9 – Распределение температуры в цилиндре для различных моментов времени (с учетом погружении в закалочную среду).

Рисунок 9-а показывает распределение температуры спустя 0,03 секунды после начала процесса закалки. Однако, за столь короткое время уже успел проявиться эффект от постепенного (не мгновенного) погружения и температура цилиндра на торце, с которого началось погружение, успела упасть с 515°С до 441°С. При дальнейшем развитии погружения (рисунок 9 б-в) неравномерность температурного поля, обусловленная погружением, только возрастала. Картина температурного поля после завершения процесса погружения представлено на рисунке 9-г, на котором видно, что торец цилиндра, с которого началось погружение, успел охладиться до 286°С.

Очевидно, что учет погружения носит важный характер для получения, приближенных к реальности, тепловых полей. Исходя из полученных данных, можно предсказать возникновение значительных термических напряжений. Например, уже через 0,33с некоторые области охладилась более чем на 200°С, что вызовет значительные термические напряжения, которые могут превысить предел текучести материала при данной температуре.

Однако, стоит заметить, что столь существенная разница в температурах, возникающая в ходе погружения, обусловлена избыточно высокой скоростью охлаждения, которая необходима для закалки алюминиевых сплавов. Скорость охлаждения в воде достигает 200°С/с (рисунок 10).

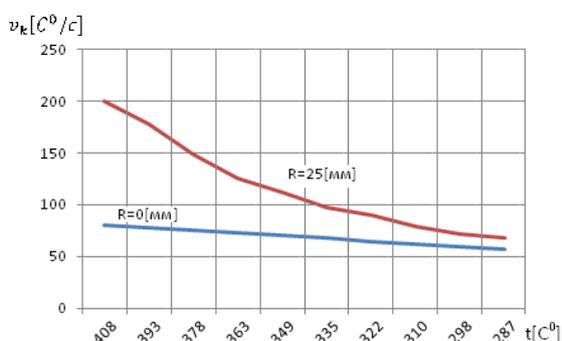


Рисунок 10 – Изменение скорости охлаждения в зависимости от температуры (линия  $R=0$ мм соответствует скорости охлаждения в центре цилиндра, линия  $R=25$ мм соответствует скорости охлаждения на поверхности цилиндра).

В случае необходимости снижения влияния эффекта погружения, в закалочную среду, возможным является изменение закалочной среды. Однако, возможность использования закалочной среды, обеспечивающей меньшую скорость охлаждения, скорее всего снизит максимальную глубину прокаливаемости. Ведь при охлаждении внутренние слои охлаждаются медленнее. При закалке в воду скорость охлаждения внешних слоев составляет порядка  $100-150^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , а внутренних слоев колеблется от  $60^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $80^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (при глубине залегания внутренних слоев материала всего 25мм, рисунок 10). Минимальная скорость охлаждения, для закалки, сплава АК6 является  $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$  [13]. Таким образом, вода является единственной средой, обеспечивающей прокаливаемость деталям из сплава АК6 толщиной до 120мм.

#### **2.4. Выводы по разделу**

Решение задачи закалки аналитическими методами представляет сложную проблему, а с учетом нелинейности различных параметров (теплообмена, физико-механических характеристик) и большой геометрической сложности деталей летательных аппаратов – практически невозможной для решения. Средством для моделирования закалки решено выбрать численные методы, реализованные в конечно-элементном пакете ANSYS. Который позволяет провести расчет с учетом нелинейности различных параметров.

Важной проблемой в решении задачи закалки является выбор явлений необходимых для учета при моделировании, таких как эффект погружения. Как наглядно показано в п.2.3. учет погружения в закалочную среду является крайне важным, а его игнорирование способно привести к некорректным результатам и построению ошибочных выводов.

### ГЛАВА 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ЗАКАЛОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ДЕТАЛЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

#### 3.1. Моделирование закалки заготовки детали летательного аппарата с учетом погружения в закалочную среду

Для моделирования реального процесса погружения было принято решение провести моделирование закалки прямоугольного стержня. Размеры стержня составили – длина  $L=200\text{мм}$ , высота  $H=41\text{мм}$ , ширина  $A=18\text{мм}$  (рисунок 11), температура нагрева стержня под закалку  $515^{\circ}\text{C}$ , температура закалочной среды  $27^{\circ}\text{C}$ , закалочная среда – вода. Расчет производился в двух вариантах:

- 1) погружение (производилось за  $0,5\text{с}$ ) вдоль размера  $H$  - далее "моделирование №1";
- 2) погружение (производилось за  $0,25\text{с}$ ) вдоль размера  $A$  - далее "моделирование №2".

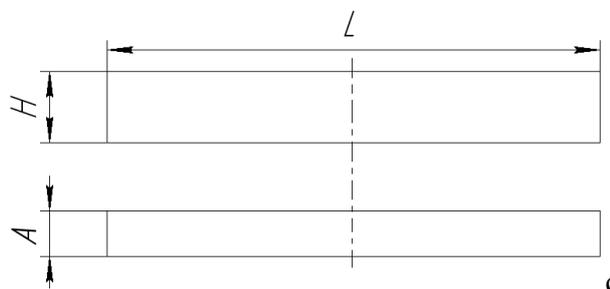


Рисунок 11 – Эскиз прямоугольного стержня.

Материал стержня АК-6. Характеристики материала брались нелинейными и зависящими от температуры. При анализе использовалась билинейная модель материала с упрочнением [47,49].

Для обеспечения стабильности решения и получения результатов начиная с первого момента времени, были использованы принципы, описанные в п.2.2. Исходя из них была построена КЭ сетка, представленная на рисунке 12.

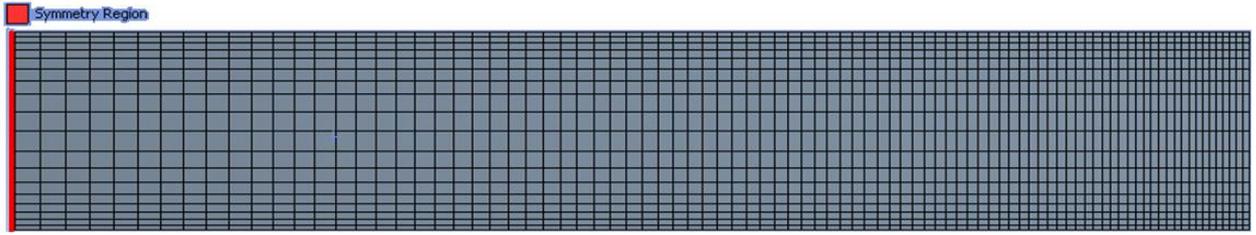


Рисунок 12 – Конечно элементная сетка.

После решения тепловой задачи было получено распределение температуры по телу в различные моменты времени погружения. На рисунке 13 изображено распределение температуры по телу в моменты времени: а) 0,03с б) 0,4с. Как видно температурные поля значительно подвержены влиянию эффекта погружения. Далее полученные результаты в тепловом решении передавались в качестве нагрузки для структурного решения, с целью определения остаточных напряжений и влияния процесса погружения в закалочную среду на конечную форму стержня.



а



б

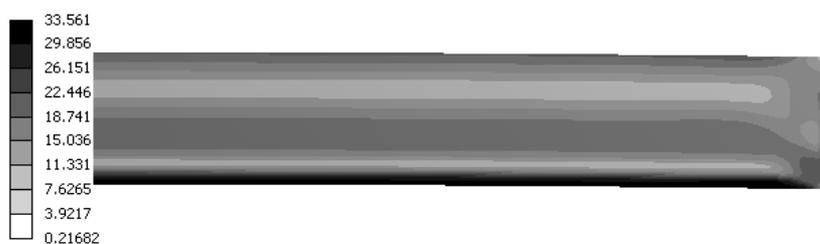
а) 0,03 с; б) 0,4 с

Рисунок 23 – Распределение температур в стержне для моделирования №2 в различные моменты времени при погружении в закалочную среду.

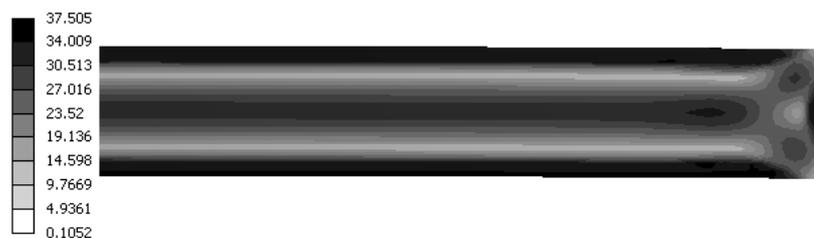
После решения структурной задачи были получены распределения эквивалентных напряжений, которые они представлены на рисунке 14. Анализируя распределение и изменение эквивалентных напряжений можно сделать вывод об однозначном влиянии погружения стержня в закалочную среду на образование остаточных деформаций.



а



б



в



г

а) 0,03 с; б) 0,13 с; в) 0,4 с; г) деталь после завершения процесса охлаждения

Рисунок 14 – Распределение эквивалентных напряжений (МПа) в стержне в различные моменты времени.

Анализируя перемещения стержня после закалки (рисунок 15) видно, что образец изогнулся в направлении погружения, что качественно подтверждается на практике, а так же упоминается в источнике [7].



а



б

Рисунок 15 – а) перемещения возникшие в результате закалки (контуром показана недеформированная модель, масштаб увеличен для наглядности) б) пластические деформации после завершения закалки.

Пронаблюдав распределение напряжений на рисунке 16, можно заметить, что из-за быстрого охлаждения внешних слоев материала они быстро уменьшаются в объеме. Внутренняя же зона охлаждается замедленно и потому препятствует сжатию внешнего слоя. В результате внутренняя зона металла оказывается сжатой, а наружная – растянутой. В последующий период внутренняя зона, охлаждаясь, уменьшается в объеме и тянет к центру наружный слой. Однако металл снаружи уже остыл и потому утратил пластичность.



а



б



в

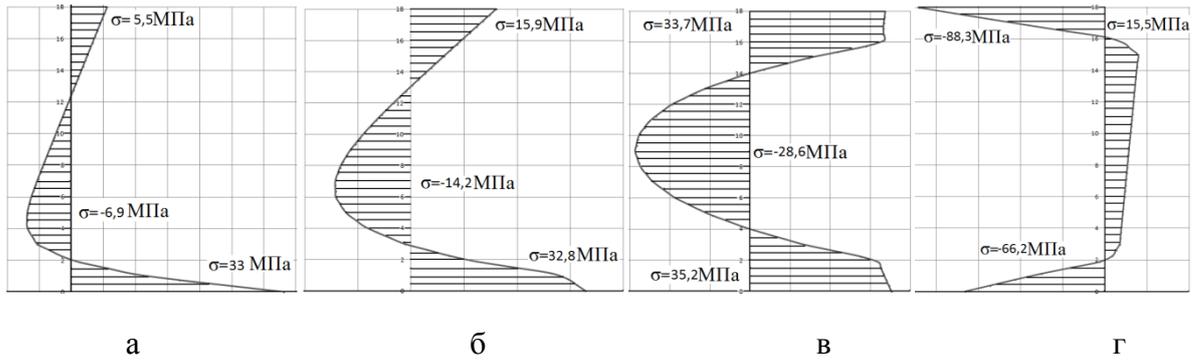


г

а) 0,03 с; б) 0,13 с; в) 0,4 с; г) деталь после завершения процесса охлаждения

Рисунок 16 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_y$  (МПа) в стержне в различные моменты времени для расчетного случая №2.

В заключительный период охлаждения в наружных слоях металла возникнут сжимающие напряжения (рисунок 17). Внутренняя же зона металла, будучи связанной с наружными слоями, не сможет уменьшиться в объеме, хотя и будет стремиться к этому. В результате в ней возникают внутренние растягивающие напряжения.



а) 0,03 с; б) 0,13 с; в) 0,4 с; г) деталь после завершения процесса охлаждения

Рисунок 17 – Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_y$  (МПа) в сечении А-Н по оси симметрии стержня в различные моменты времени для моделирования №2.

Несмотря на сходство качественной картины распределения остаточных напряжений и их значений, для обоих вариантов расчета, но перемещения, возникшие в стержне, существенно различаются, что логичным образом объясняется различным значением момента инерции относительно оси перпендикулярной направлению погружения (рисунок 18 Рисунок ). При использовании данного стержня в качестве заготовки в реальном производстве, возникли бы проблемы связанные с установкой заготовки, и вписываемостью детали в заготовку, для случая моделирования №1, так как значения перемещений достаточно велики.

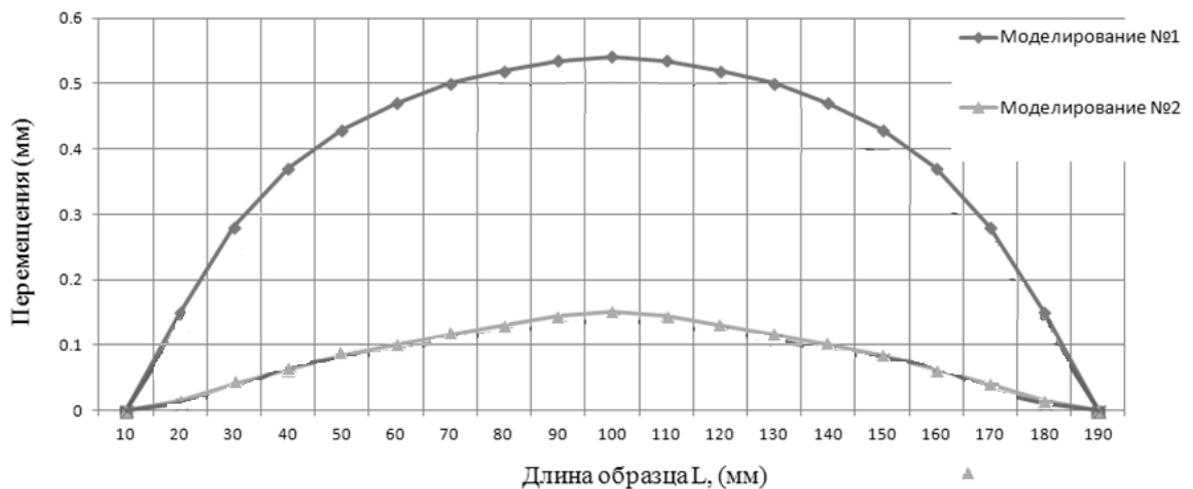


Рисунок 18 – Изменение перемещений по длине образца.

Таким образом, при закалке, появляется необходимость учитывать геометрические характеристики закаливаемой заготовки. Отметим, что при погружении вдоль оси, относительно которой момент инерции меньше, возникнут и меньшие поводки заготовки. А, с учетом малой жесткости заготовок деталей ЛА, выявляется необходимость учета пространственного положения при закалке.

### **3.2. Закалка стержня, оценка влияния погружения на остаточные деформации**

Для оценки описанных выше принципов моделирования и верности сделанных допущений, а также оценки степени влияния на остаточные деформации процесса закалки было проводился натурный эксперимент по закаливанию прямоугольных брусков выполненных из сплава АК6. Бруски были выполнены на станках с ЧПУ, эскиз брусков был представлен на рисунке 9 в п.3.1.

Эксперимент проводился в двух вариантах – с различными направлениями погружения в закалочную среду: 1) погружение вдоль стороны А; 2) погружение вдоль стороны Н (рисунок 11).

Для проведения эксперимента на поверхность образца, вдоль которой осуществлялось погружение, наносилась делительная сетка (рисунок 19).

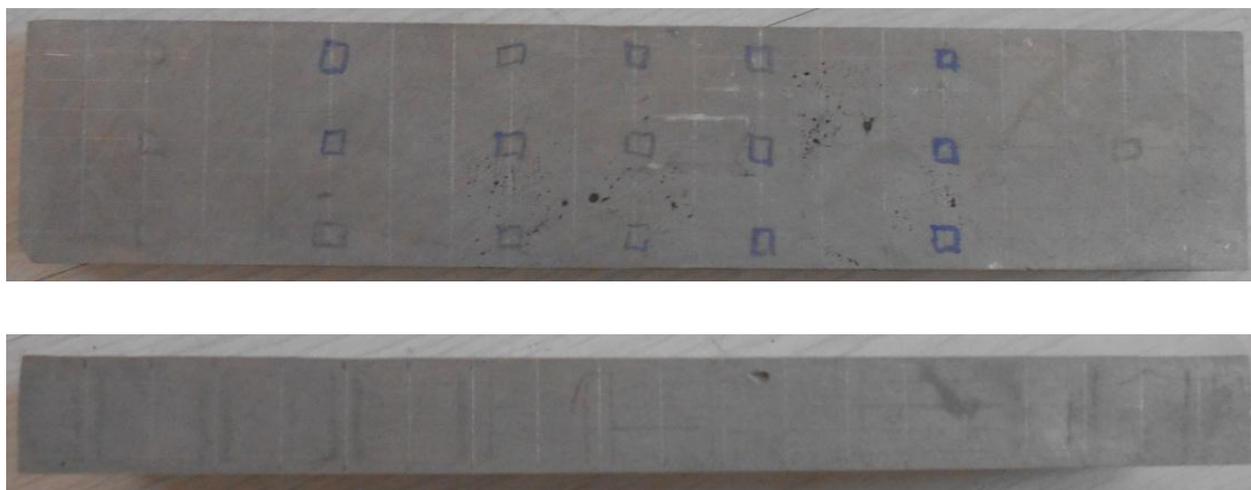


Рисунок 19 –Общий вид образцов с нанесенной делительной сеткой.

Посредством измерения изменения взаимного расположения точек пересечения линий сетки, до и после, происходила оценка изменения формы бруска, возникшая в результате закалки.

С каждого образца получали 70 (10 линий вдоль стороны Н и 7 линий вдоль L) характерных точек для случая погружения вдоль стороны Н и 40 точек (10 линии вдоль А и 4 линии вдоль L) для образцов с погружением вдоль стороны А.

После проведения закалки повторное измерение координат точек должна производиться в течение первых шести часов. Соблюдение этого правила необходимо в виду недопущения влияния эффекта старения, а как следствие и эффектов ползучести, на результаты эксперимента.

Далее строились характерные зависимости средних значений перемещений по длине образца для обоих вариантов эксперимента (рисунок 20). Эти зависимости, аппроксимированные сплайном, сравнивались с расчетными данными, представленными в п.3.1.

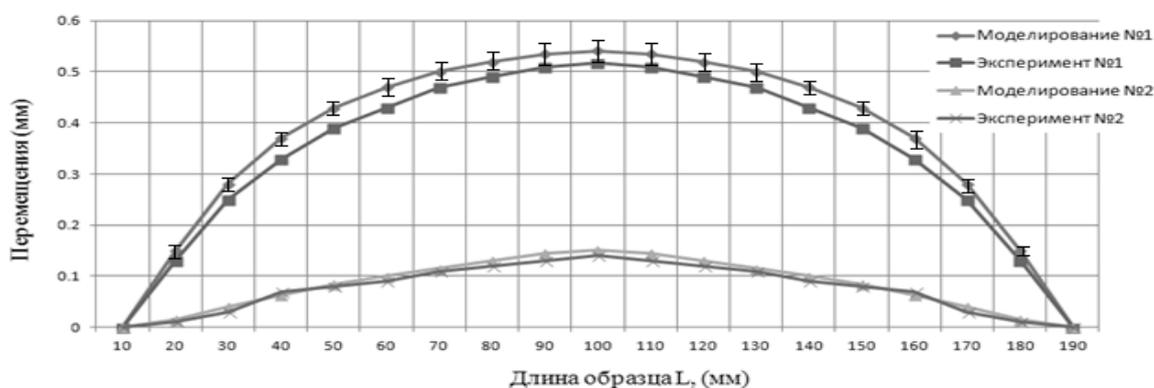


Рисунок 20 – Сравнение экспериментальных и расчетных кривых деформирования.

Изменения координат точек вдоль стороны L образца принимались незначительными, и рассматривалось изменение положения точек вдоль стороны Н и А, для оценки величины прогиба. Измеренные значения усреднялись по всем экспериментам. Сравнение экспериментальных данных с моделированием приведено на рисунке 20.

Для каждой точки мерительной сетки рассчитывалась относительная погрешность моделирования по сравнению с осредненными данными

экспериментов. Полученное распределение изменение относительной погрешности по линии точек представлено на рисунке 21.

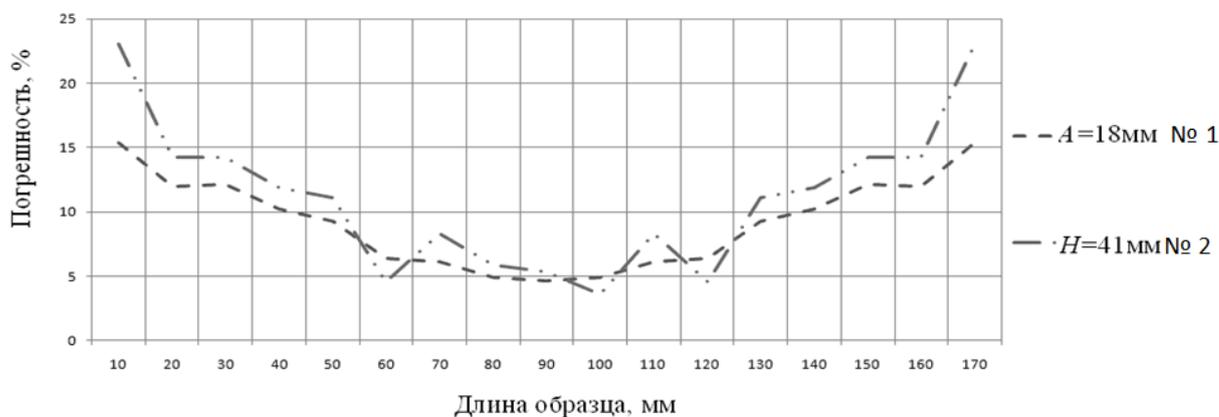


Рисунок 21 – Распределение погрешности, рассчитанного перемещения точек сетки к полученным экспериментально, в зависимости от длины образца.

Таким образом, можно заключить, что характер деформаций полученных экспериментально, в достаточной мере соответствует теоретическим расчетам.

Погрешность эксперимента оценивалась по остаточным деформациям и достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Наибольшая погрешность наблюдается в точках с наименьшими остаточными деформациями, что может быть связано с различными факторами: принятыми гипотезами при расчете, особенностью деформирования поверхностных слоев ослабленных рисками мерной сетки, а также погрешностью оборудования, в виду малости измеряемой величины.

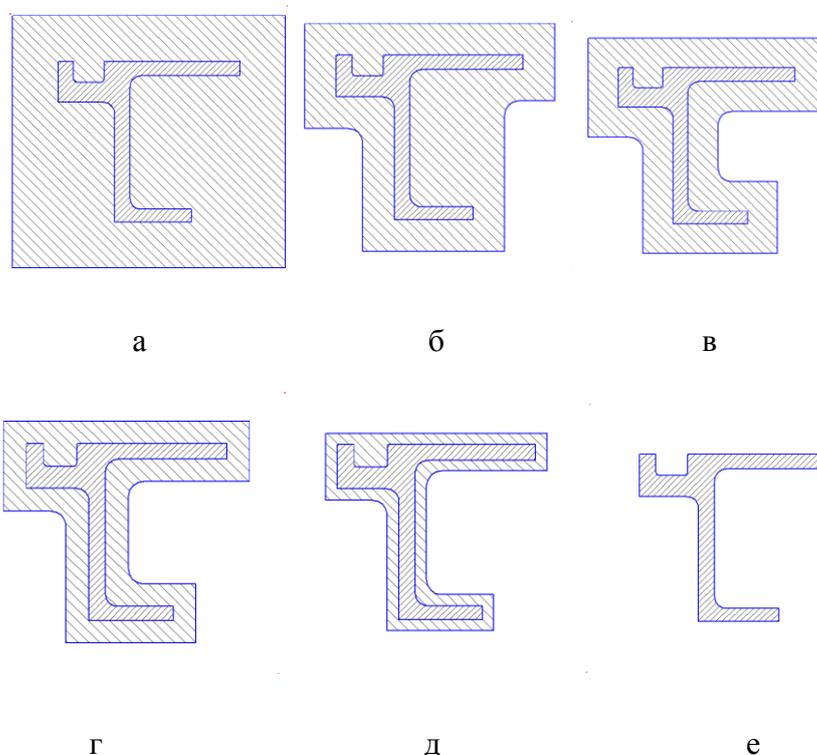
Представляется логичным заключить, что при закалке стоит стремиться не к сокращению времени погружения за счет погружения вдоль наименьшей стороны детали, а к погружению детали вдоль максимальной жесткости, для предотвращения поводок. Таким образом погружение вдоль большего измерения (длины) стержней или цилиндров представляется наиболее логичным.

Корпусные же детали стоит рассматривать как набор более простых геометрических тел и выбирать такое направление погружения, при котором

меньшее количество этих тел будет погружаться вдоль стороны с наименьшей жесткостью.

### 3.3. Моделирование закалки сечения заготовки детали летательного аппарата с различным припуском

Инженеру на производстве требуется иметь представление влияния припуска на склонность заготовки детали к поводкам. Средством решения такой задачи может служить численное моделирование закалки сечения заготовки детали [50]. Моделирование закалки проводилось в плоской постановке для произвольного сечения детали с различными вариантами припуска (рисунок 22).



а) заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском; б) припуск 12 мм с напуском; в) равномерный припуск 12 мм; г) равномерный припуск 8 мм; д) равномерным припуском 4 мм; е) сечение детали без припуска

Рисунок 22 – Общий вид сечения детали с припуском.

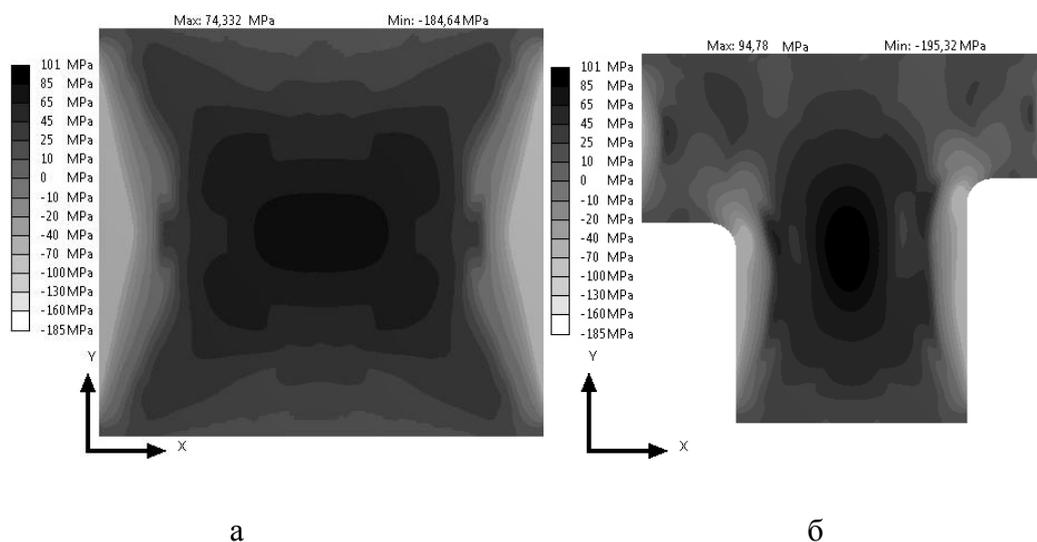
В численном моделировании рассматривались 5 вариантов припуска:

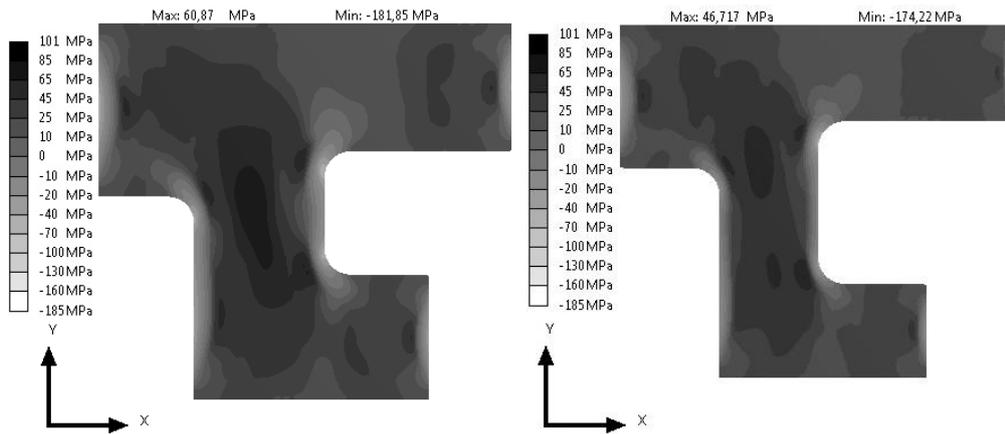
1) заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском (рисунок 23-а);

- 2) припуск 12 мм с напуском (рисунок 22-б);
- 3) равномерный припуск 12 мм (рисунок 22-в);
- 4) равномерный припуск 8 мм (рисунок 22-г);
- 5) равномерный припуск 4 мм (рисунок 22 д).

Как и ранее решение проводилось в два этапа. Первый этап включал решение нестационарной тепловой задачи, а второй – решение квазистационарной структурной задачи. Для теплового анализа в качестве граничных условий задавались граничные условия 3-го рода. Первоначальное распределение температуры принималось равномерным и равным  $515^{\circ}\text{C}$ , температура закалочной среды  $25^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи зависел от температуры поверхности теплообмена согласно зависимости представленной на рисунке 8 (п2.2.). Характеристики материала задавались зависимыми от температуры, материал детали – алюминиевый деформируемый сплав АК6.

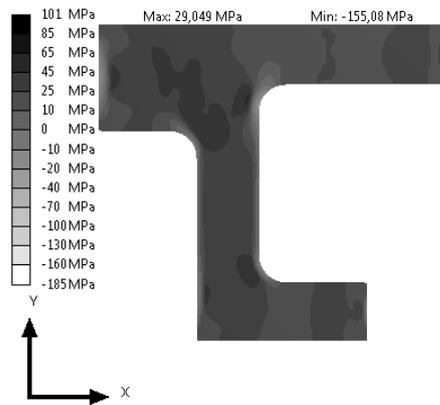
На рисунке 23 и 24 представлены результаты расчета, в виде распределения нормальных напряжений для каждого варианта припуска. Как можно заметить величина максимальных напряжений для каждого варианта припуска различается не значительно. Однако различие в распределении напряжений по сечениям для каждого варианта очевидно. При рассмотрении сечений с равномерным припуском можно заметить тенденцию к уменьшению зон занятых напряжениями свыше  $45\text{МПа}$ . (рисунок 23 в–д).





B

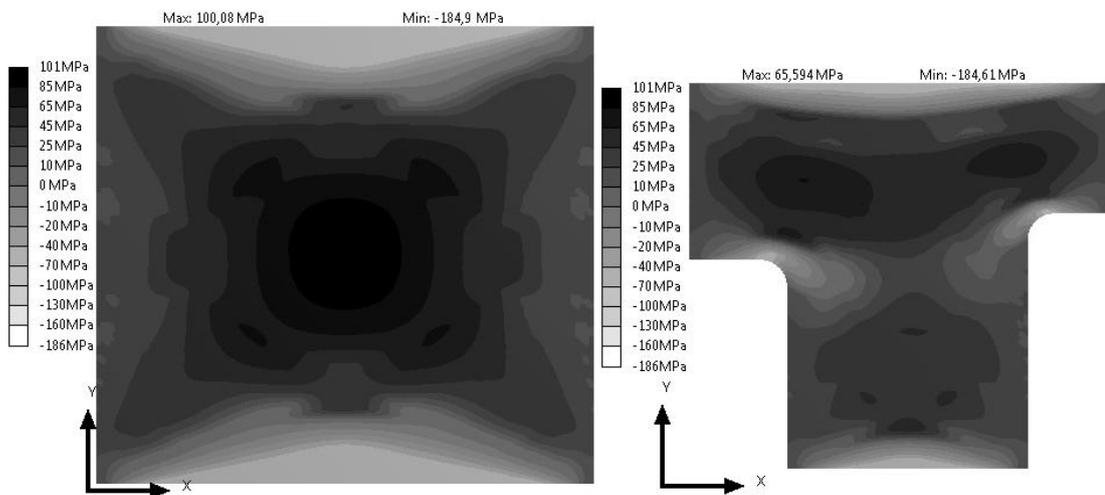
Г



Д

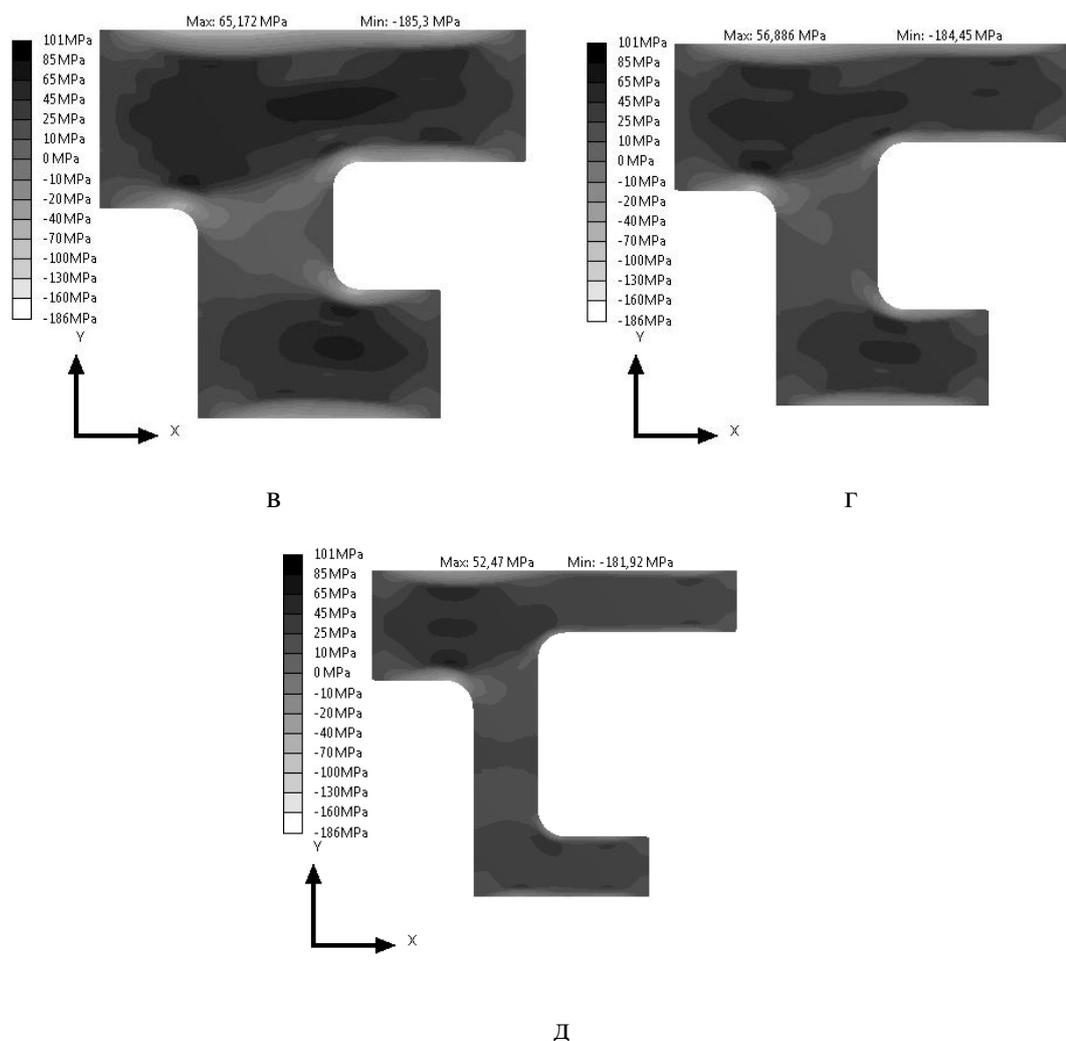
а) заготовка прямоугольной формы с неравномерным припуском; б) припуск 12 мм с напуском; в) равномерный припуск 12 мм; г) равномерный припуск 8 мм; д) равномерным припуском 4 мм

Рисунок 23 – Нормальные напряжения  $\sigma_y$ .



а

б



а) заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском; б) припуск 12 мм с напуском; в) равномерный припуск 12 мм; г) равномерный припуск 8 мм; д) равномерным припуском 4 мм

Рисунок 24 – Нормальные напряжения  $\sigma_x$ .

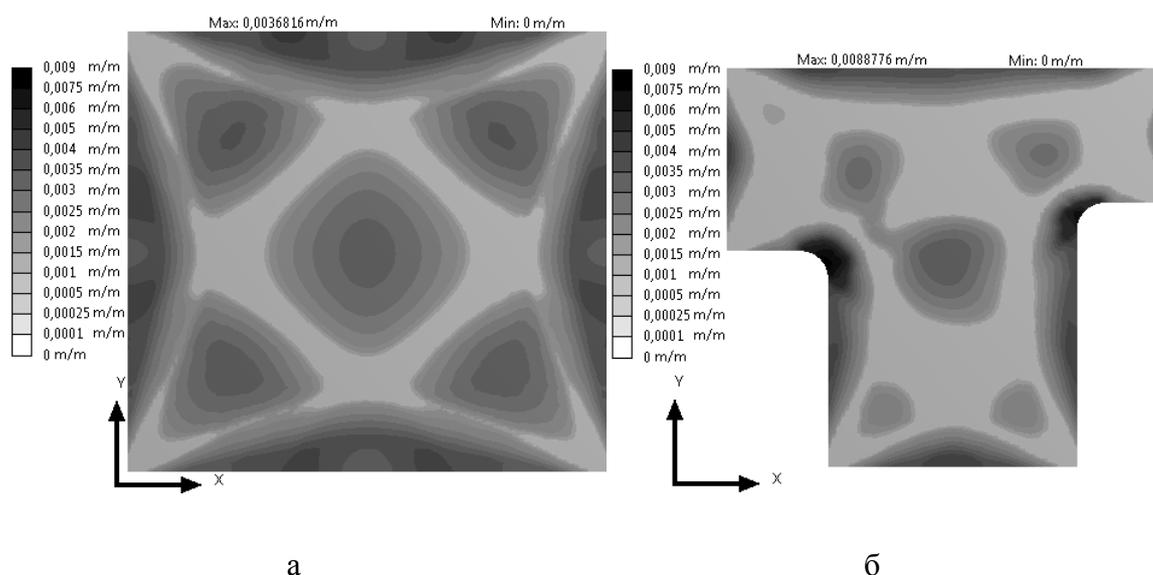
С ростом припуска, растет площадь сечения занятой напряжениями с абсолютным значением от 100 МПа до 180 МПа. Применение умеренного значения припуска 4–8 мм (рисунок 23,24 г–д) способствует более равномерному распределению напряжений, причем высокий уровень напряжений (более 60 МПа) наблюдается лишь в поверхностных слоях сечения, а по телу сечения преобладают напряжения менее 60 МПа.

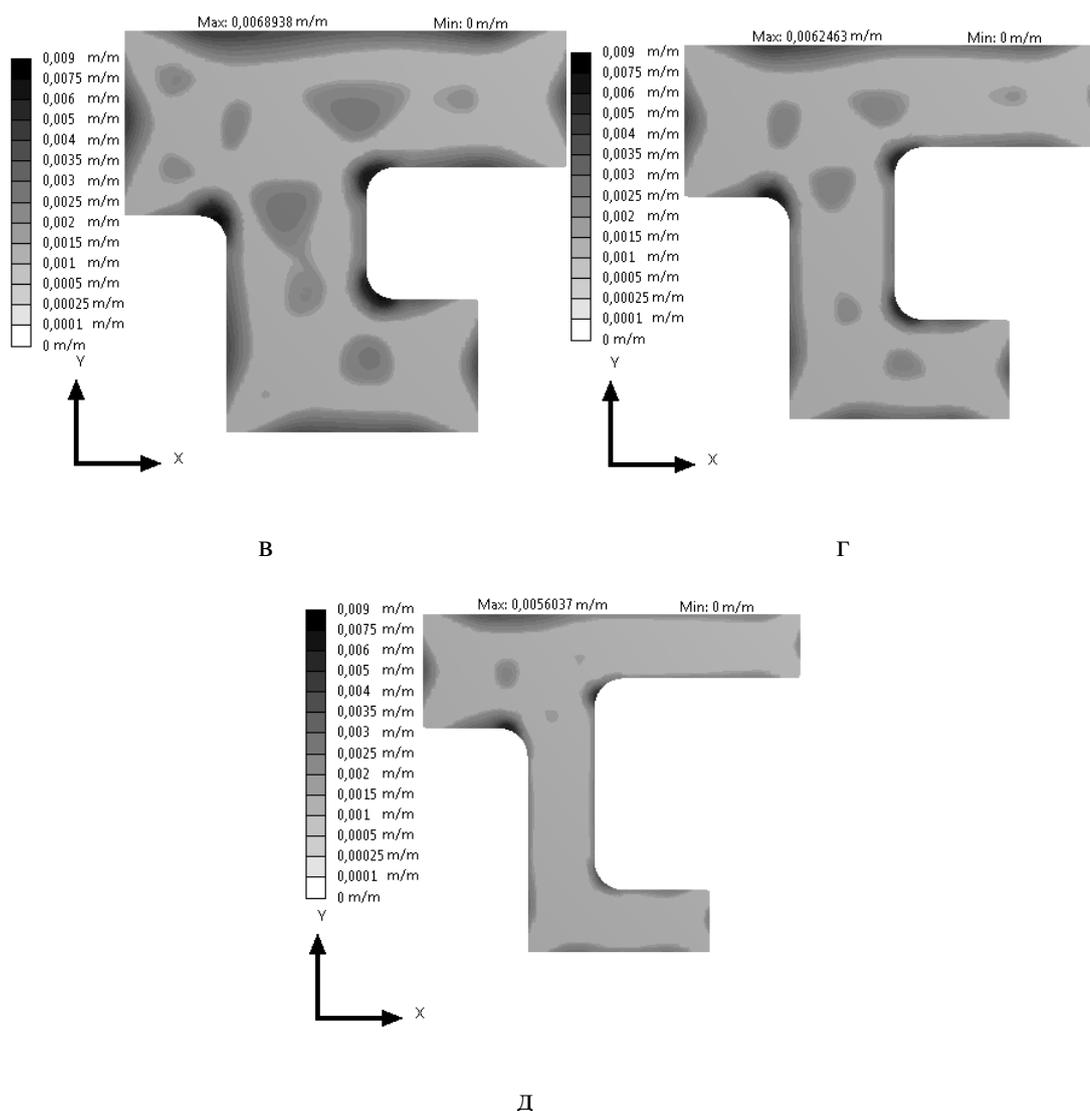
Как известно [51] растягивающие напряжения являются более опасными, так как могут привести к образованию трещин. Если пронаблюдать распределение нормальных напряжений на рисунках 23 и 24, то можно увидеть, что растягивающие напряжения сосредоточены вблизи поверхности заготовки. С

увеличением припуска растёт глубина проникновения растягивающих напряжений, которые для случая с прямоугольным сечением заготовки (рисунок 23-а и 24-а) могут достигать границ детали. При удалении верхних слоев материала, в которых сосредоточены остаточные растягивающие напряжения, в процессе финишной механической обработки произойдет высвобождение средних сжатых слоев материала.

Перераспределения напряжений приведёт к повторному образованию растягивающих напряжений уже на поверхности готовой детали, а это в свою очередь, повлияет на её геометрию после высвобождения из прижимов. Назначение минимального припуска благоприятным образом сказывается на снижении остаточных деформаций и внутренних напряжений. Вышесказанному соответствуют варианты с припуском 4-8 мм (рисунок 23,24 г-д).

Распределение пластических деформаций представлено на рисунке 25. Видно, что с увеличением припуска зоны пластических деформаций также увеличиваются. Максимальная наблюдаемая величина пластических деформаций примерно одинакова для всех вариантов.





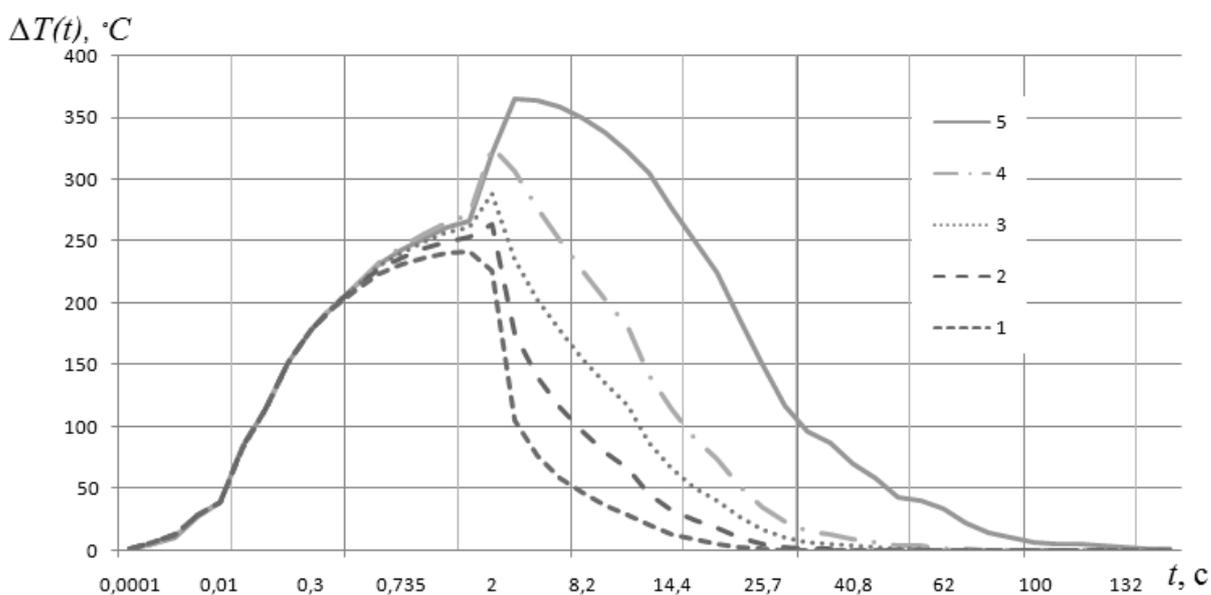
- а) равномерный припуск 4 мм; б) равномерный припуск 8 мм; в) равномерный припуск 12 мм;  
 г) не равномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д) заготовка прямоугольной формы с  
 неравномерным припуском

Рисунок 25 – Распределение пластических деформаций.

Исключение составляет варианта сечения заготовки в форме прямоугольника. Отличие от остальных – примерно в 1,7 раза. Минимизация припуска хоть и не способствует снижению уровня пластических деформаций, но позволяет их локализовать и свести к минимуму зоны подверженные им. Если проанализировать расположение зон пластических деформаций на рисунок 25, то можно заметить закономерность в их расположении – наибольшая глубина проникновения пластических деформаций наблюдается в сторонах сопряженных

с открытыми углами, а наибольший уровень пластических деформаций наблюдается в закрытых углах.

На Рисунок 26 представлен график  $\Delta T(t) = T_{\max}(t) - T_{\min}(t)$ . Хорошо заметно, что сечение с минимальным припуском имеет минимальное значение  $\Delta T$ . Это можно легко объяснить тем, что в виду меньшей толщины припуска, внутренние области охлаждаются быстрее и как следствие имеют меньшую разницу в температуре с внешними слоями. Что и приводит в конечном итоге к меньшим остаточным напряжениям.



1) сечение с равномерным припуском 4 мм; 2) сечение с равномерным припуском 8 мм; 3) сечение с равномерным припуском 12 мм; 4) сечение с неравномерным припуском от 8 мм до 18 мм; 5) сечение прямоугольной формы с неравномерным припуском

Рисунок 26 – Изменение  $\Delta T(t)$  с течением времени в различных сечениях.

Меньший припуск означает, что сечение обладает меньшим моментом инерции в направлении, перпендикулярном оси погружения, и большей склонностью к короблению, которая приводит к:

- неписываемости детали в заготовку;
- невозможности закрепления заготовки в технологических приспособлениях;
- механической обработки в напряженном состоянии.

В конечном итоге это приводит к браку, что является недопустимым. Можно сделать вывод, что момент инерции в направлении, перпендикулярном оси погружения, площадь сечения заготовки и максимальная возникающая разница температур  $\Delta T$  при закалке являются основными факторами образования поводок.

### **3.4. Выводы по разделу**

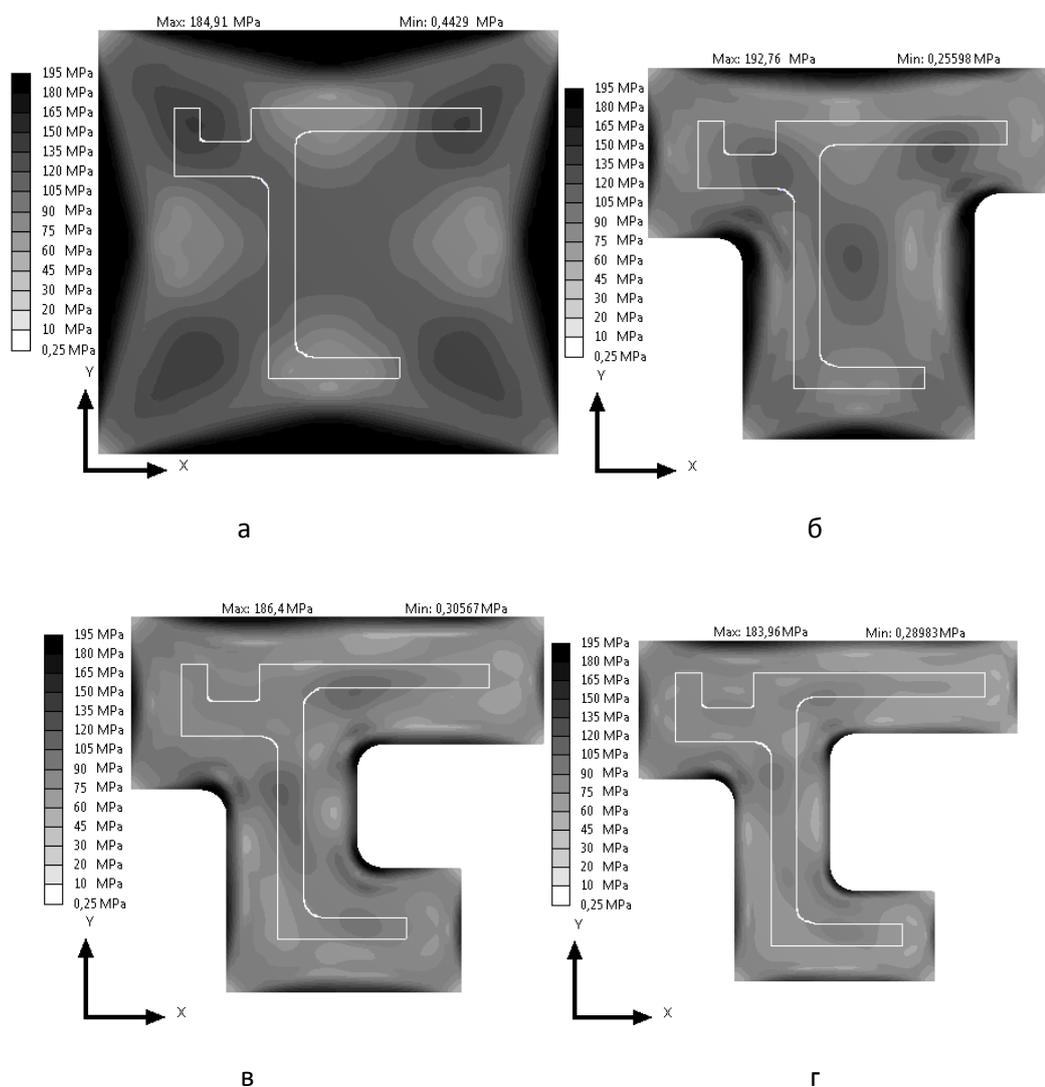
Погружение в ходе процесса закалки оказывает безусловное влияние на поводки, возникающие при закалке. Уровень поводок при закалке непосредственно связан с направлением погружения заготовки и моментами инерции сечения, и чем больше момент инерции (относительно оси перпендикулярной оси погружения) тем меньшие поводки возникнут в результате закалки.

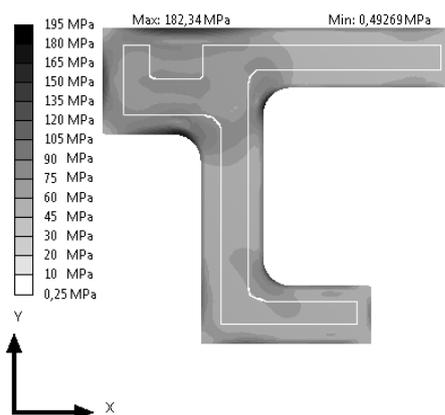
Различные варианты припуска оказывают различное влияние на распределение остаточных напряжений возникающих в заготовке. Уровень максимальных напряжений мало зависит от величины припуска, также примерно совпадают зоны их максимального значения: радиусы скругления (концентраторы); «середины стенок». Значительно меняется лишь глубина проникновения максимальных напряжений, – «глубина дефектного слоя». Меньший припуск приводит к образованию меньших остаточных напряжений, в виду меньшей, возникающей при охлаждении, разницы температур между различными областями заготовки.

## ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ МЕЖОПЕРАЦИОННОГО ПРИПУСКА

### 4.1. Влияние величины межоперационного припуска на деформации деталей ЛА.

Остаточные технологические напряжения, возникающие в процессе производства детали, оказывают значительное влияние на характеристики готовой детали. Как было показано в главе 3, остаточные закалочные напряжения имеют значительный уровень, и их распределение значительно зависит от межоперационного припуска. На рисунке 27 представлены картины остаточных эквивалентных напряжений с нанесенными контурами готовой детали.





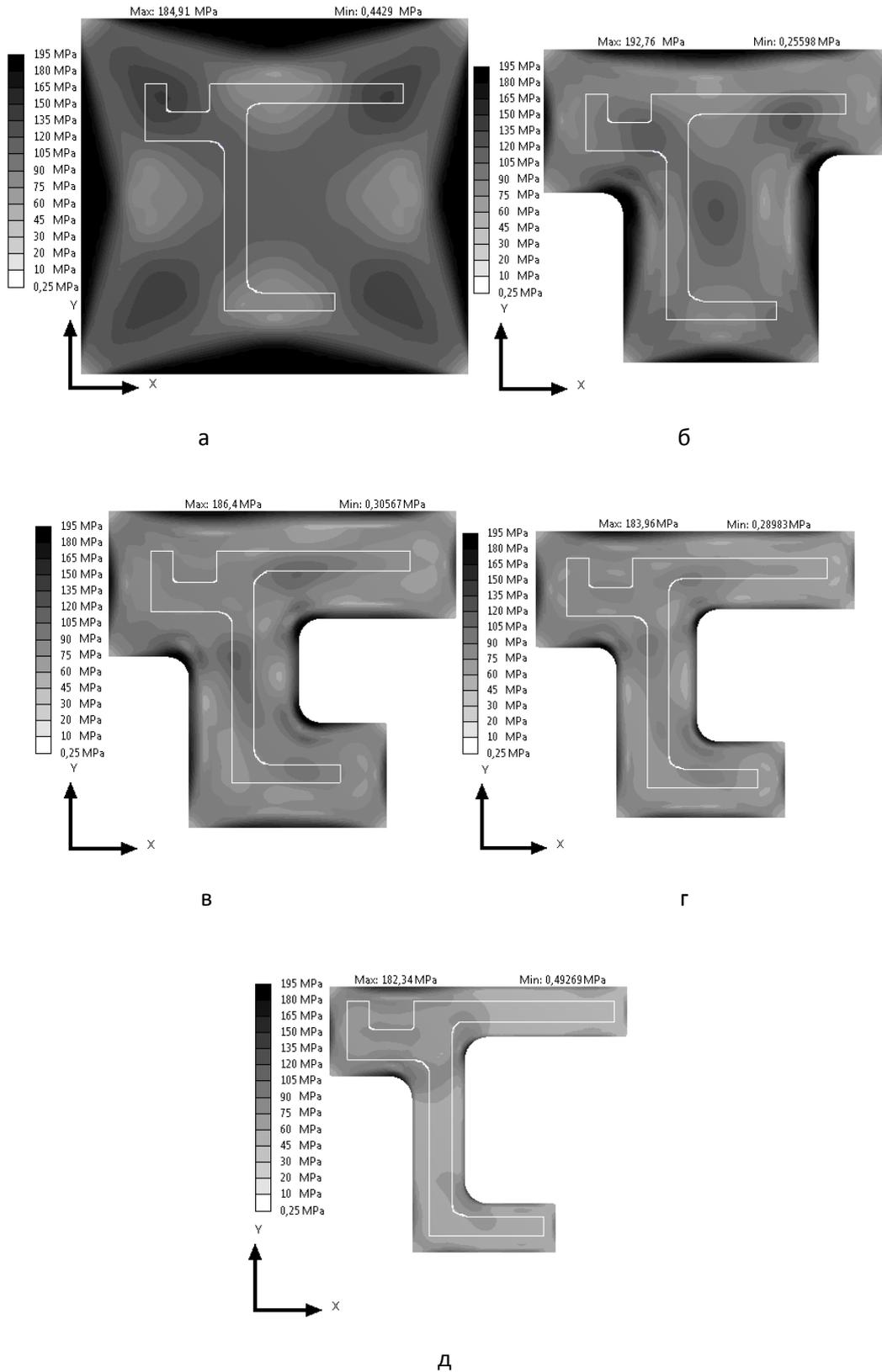
д

а) заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском; б) припуск 12 мм с напуском; в) равномерный припуск 12 мм; г) равномерный припуск 8 мм; д) равномерный припуск 4 мм

Рисунок 27 – Общий вид сечения детали с припуском.

Как можно видеть контуры детали включают зоны значительных остаточных напряжений и характеризуются значительной неравномерностью. Снижение величины припуска приводит к снижению глубины проникновения максимальных напряжений, – глубины дефектного слоя (рисунок 27), однако при дальнейшем снижении припуска толщина дефектного слоя хоть и снижается, однако сокращается и расстояние между зоной повышенных напряжений и границей детали. Из этого можно предположить, что большая неравномерность распределения остаточных напряжений на границе и внутри контура готовой детали приведет к перераспределению остаточных напряжений и, как следствие, к деформациям, к поводкам готовой детали.

Очевидно, что характер распределения остаточных напряжений, влияет на искажение формы готовой детали. Расположение зон больших напряжений в границах контура будущей детали приведет к перераспределению напряжений после удаления припуска. Однако не столько величина напряжений влияет на искажение формы готовой детали, сколько прохождение границ детали через места значительного изменения уровня напряжений или даже их «знака».



а) равномерный припуск 4 мм; б) равномерный припуск 8 мм; в) равномерный припуск 12 мм;  
г) не равномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д) заготовка прямоугольной формы с  
неравномерным припуском

Рисунок 28 – Общий вид сечения детали с припуском.

Можно однозначно сказать, что большая разница в максимальной и минимальной температуре, наблюдаемой при закалке, приведет к большей неравномерности распределения остаточных напряжений. Однако минимизация неоднородности распределения остаточных напряжений не гарантирует минимум остаточных деформаций. Снижение же остаточных деформаций связано с геометрическими параметрами сечения детали. Увеличение момента инерции сечения детали приведет к увеличению геометрических размеров и как следствие к росту максимальной разницы температуры и росту остаточных деформаций.

Таким образом, в рамках рассматриваемой задачи было бы желательным иметь инструмент позволяющий определять величину припуска не соответствующую минимально возможной величине термических напряжений, а минимальной величине остаточных деформаций, – как оптимального сочетания максимально наблюдаемой разнице температур так и геометрических характеристик.

Исходя из описанных соображений автором предлагается показатель:

$$Pv = \frac{J_x}{S \cdot \Delta t_{max}} \quad (13)$$

где  $J_x$  – геометрический момент инерции относительно оси перпендикулярной оси погружения "у",  $S$  – площадь сечения,  $\Delta t_{max}$  – максимальная разница температур, наблюдаемая при охлаждении заготовки с данным припуском.

Показатель (13) позволяет учитывать не только характеристику жесткости сечения, но и неоднородность теплового поля возникающую при закалке.

Сравнив несколько вариантов припуска у инженера появляется возможность провести осмысленный выбор в пользу заготовки обладающей оптимальным отношением жесткости к перепаду температуры наблюдаемой при закалке. Безусловно, это будет являться одной отправной точкой из многих, для назначения припуска, ведь всегда стоит помнить про принципы его назначения исходя из различных технологических параметров, и описанными авторами, обзор работ которых представлен в первой главе.

#### 4.2. Выбор величины припуска путем оптимизации показателя.

Оптимизация припуска является лишь частью более глобальной проблемы повышения качества ЛА. Ведь в общем случае целевой функцией будет выступать как раз качество ЛА, которое зависит от эффективности и экономичности ЛА [52]. Которые, впрочем тоже связаны, ведь повышение затрат, при должной научно-технической базе, приведет к повышению эффективности ЛА, но в конечном итоге может привести как к повышению его качества, так и к падению. Очевидно что максимальное качество ЛА характеризуется затратами стремящимися к нулю, а эффективностью стремящейся к бесконечности, очевидно что это невозможно, а потому стоит вести речь лишь о неполной оптимизации.

Так если рассматривать фонарь в данных рамках то можно заключить следующее: улучшение аэродинамики фонаря повысит эффективность самолёта, за счет снижения аэродинамического сопротивления и как следствие либо повышение скорости ЛА, либо снижения экономических затрат на топливо, что уже является вторым аргументом целевой функции. Однако увеличившаяся сложность фонаря приведет к росту затрат на его производство, и снизит качество ЛА. Разумным представляется стремление к увеличению ресурса, снижению эксплуатационных издержек, для увеличения часов налёта и стимулированию роста экономичности. Увеличение ресурса потребует снижения уровня остаточных напряжений и косвенно увеличения массы фонаря. Таким образом, данные факторы представляются противоречащими друг другу.

Однако, если оставить вопросы конструкции ЛА и рассмотреть лишь технологические вопросы производства, их влияние на конечную целевую функцию - качество ЛА, то становится понятным следующее: увеличение качества ЛА возможно лишь за счет снижения экономических затрат на производство переплета рамы фонаря, поскольку эффективность ЛА оставили в рамках решения конструкторской задачи оптимизации.

В рассматриваемом случае затраты на производство рамы переплета фонаря будут состоять из прямых и косвенных издержек. Вопросы косвенных издержек

напрямую связаны с оптимизацией самого производства и непосредственно каждого конкретного предприятия. Прямые же издержки напрямую связаны с приобретением необходимого количества материала (заготовок), необходимого инструмента и иных затрат на производство.

В рассматриваемом случае производства рамы переплёта фонаря значительную часть затрат составляют:

1 затраты на материал (поковка АК6Т2 массой 1650 кг)

2 затраты на металлорежущий инструмент

3 затраты на закалку промежуточной заготовки

4 затраты на станочное время (время загрузки оборудования - станков с ЧПУ)

В виду значительных размеров рамы переплета фонаря требуется заготовка значительных размеров, при этом коэффициент использования материала крайне мал, при массе готовой рамы переплета фонаря 14 кг, заготовка весит более полутора тонн ( $K_{ИИ} = 0,008$ ). увеличение КИИ возможно лишь при переходе на заготовку меньшей массы, например на поковку. Однако данный вопрос относится к серийности изделия, и спросу на самолет, который зависит от многих факторов.

Затраты на металлорежущий инструмент связаны с необходимостью удаления большого количества материала заготовки. Однако заготовка проходит этап закалки, после чего необходимо применять более дорогостоящий металлорежущий инструмент, таким образом необходимо минимизировать припуск оставляемый перед закалкой. Аналогичная ситуация связана со станочным временем, ведь улучшенные характеристики материала приводят и к увеличению времени обработки детали после закалки. Идеальным в данном случае являлось бы удаление всего материала с заготовки, и проведение закалки уже готовой детали без припуска. Что приведет к остаточным деформациям детали после закалки, ухудшенной характеристике поверхностного слоя детали (накопленные повреждения в ходе технологической операции закалки) и т.д. Таким образом требуется определить оптимальное значение припуска.

Однако данная задача усложняется наличием остаточных напряжений после закалки, которые, после удаления припуска, перераспределяются и приводят к искажению формы детали. Толщина заготовки непосредственно влияет не столько на величину остаточных напряжений, сколько на характер их распределения.

Получается, задача определения припуска, с одной стороны ограничена требованием снижения затрат на станочное время и металлорежущий инструмент, с другой стороны снижением затрат на закалку (чем меньше припуск тем меньше требуется времени на прогрев и выдержку в печи), с другой стороны необходимостью снижения остаточных напряжений непосредственно в готовой детали, дабы после изготовления – деформации детали, после высвобождения из приспособления, не превышали допустимых [53].

Выбор величины припуска при помощи оптимизационного показателя необходимо осуществлять посредством отыскания максимального значения. При данной постановке задачи оптимизации необходим объект оптимизации и цель оптимизации. Данная задача оптимизации должна требовать экстремального значения лишь одной величины. В рамках рассматриваемой работы в качестве поиска минимального значения величины остаточных деформаций, возникающих в результате изготовления детали. Однако при такой постановке задачи возникает ряд непреодолимых трудностей связанных с решением нелинейных нестационарных задач охлаждения и деформирования твердых тел произвольной формы в ходе закалки. Тем более является невозможным применения подобного способа в инженерной практике.

В предложенном критерии площадь, момент инерции, и косвенно максимальный перепад напряжений являются функциями от величины припуска. Однако стоит заметить, что оптимальное значение показателя соответствует определенному значению величины перепада температуры и жесткостным характеристикам сечения. Однако это будет соответствовать неправильной постановке задачи оптимизации так как системе не должно приписываться более одного критерия оптимизации.

Для решения задачи оптимизации величины критерия склонности сечения к закалочным остаточным деформациям наиболее подходящим представляется одномерная оптимизация. Методы одномерной оптимизации разделяются на подклассы по следующим принципам:

- использование в процессе поиска экстремума информации о самой функции, так как в ряде задач целевая функция задана таким образом, что точных значений производных найти нельзя (только оценить),
- использование в процессе поиска экстремума информации о самой функции или её производных,
- по виду целевой функции (решения одно- и многоэкстремальных задач)

Очевидно, что доступными будут лишь некоторые значения функции на определённом интервале значений величины припуска. Ввиду этого, из множества способов одномерной оптимизации, целесообразным представляется использовать численные методы аппроксимации [54]. Автор сообщает нижеследующее. В методах прямого поиска мы не имеем никакой информации о минимизируемой (максимизируемой) функции за исключением ее значений в выбранных нами точках и предположения, что она непрерывна и является унимодальной функцией на рассматриваемом отрезке. Если функцию в некоторой окрестности точки ее минимума можно достаточно точно заменить (аппроксимировать) многочленом, то для ее минимизации целесообразно использовать так называемые методы полиномиальной аппроксимации. Их общая особенность состоит в вычислении коэффициентов многочлена по известным значениям функции в отдельных точках и последующем нахождении минимума этого многочлена с использованием необходимых и достаточных условий экстремума. Основная идея метода: возможность аппроксимации гладкой функции полиномом достаточно высокого порядка и использование этого полинома для оценивания точки оптимума. Качество этой оценки может быть повышено двумя способами [54]:

- увеличением степени полинома;

– уменьшением интервала аппроксимации.

Второй способ предпочтительнее, так как построение полинома порядка более 3 – достаточно сложная задача, а сужение интервала для унимодальной функции – достаточно простая [54].

Использование квадратичной аппроксимации для нахождения оптимума. Чтобы функция имела минимум внутри отрезка она должна быть, по крайней мере квадратичной. Для построения квадратичной функции достаточно трех точек:  $M_1(x_1, y_1)$ ,  $M_3(x_3, y_3)$ ,  $M_2(x_2, y_2)$ . Можно задать аппроксимацию функции полиномом вида [54]:

$$P_2(x) = a_0 + a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x - x_2) \quad (14)$$

И выбрать  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  так, чтобы  $P_2(x_1)=y_1$ ,  $P_2(x_2)=y_2$ ,  $P_2(x_3)=y_3$ . Отсюда следует, что:

$$a_0 = y_1, a_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, a_2 = \frac{1}{x_3 - x_2} \cdot \left( \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)$$

Найдем стационарную точку  $x^*$  полинома  $P_2(x)$ :

$$x^* = \frac{x_3 - x_2}{2} - \frac{a_1}{2a_2} \quad (154)$$

Так как функция унимодальна на рассматриваемом интервале и полином  $P_2(x)$  тоже унимодальная функция, то  $x^*$  является приемлемой оценкой истинного оптимума. Метод Пауэлла основан на последовательном применении процедуры оценивания с использованием квадратичной аппроксимации [54].

Таким образом, обобщив всё выше сказанной методике определения припуска можно описать следующим алгоритмом:

1. Выбор типичных сечений детали: необходимо проанализировав конструкцию детали произвести выбор необходимого количества сечений. Производить выбор сечений для определения показателя  $Pv_y$  необходимо не только на основании геометрических различий формы, но толщин полок, стенок и т.д. При современном уровне автоматизации конструкторской деятельности и переход к технологиям трехмерного моделирования получить необходимые сечения не представляется проблематичным. Любая САД система в состоянии

построить требуемое сечение, и в последствие получить все необходимые данные о нём (площадь, момент инерции и т.д.)

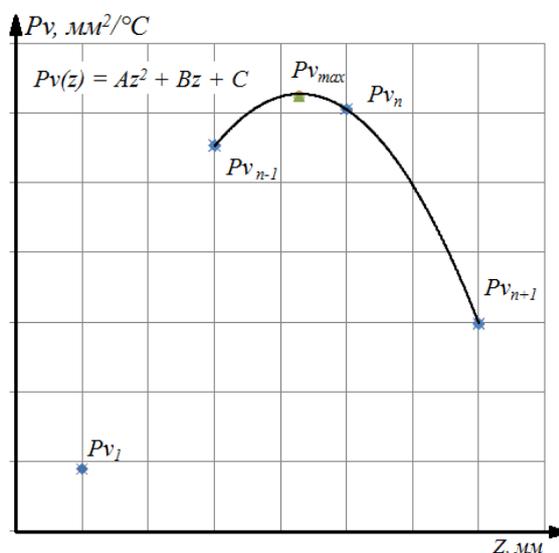
2. Построение сечений с различным припуском: после того как было построено сечение необходимо построить сечения с различным припуском. Целесообразным представляется рассматривать припуск до 200% , с шагом 50% начиная от минимального припуска рассчитанными по методике разработанной профессором Кован. Данные значения не являются жесткими требованиями, а лишь разграничивают возможное поле применяемых припусков. Также шаг возможно увеличить для получения более точной кривой  $Pv$  в зависимости от величины припуска, основным требованием будет оставаться наличие максимума на графике.

3. Определение  $\Delta t_{max}$ : произвести численный эксперимент по определению максимального перепада температуры в процессе закалки, при охлаждении. Это возможно осуществить как с применением современных CAE пакетов, так путем решения нестационарной задачи охлаждения тела произвольной формы. Последнее является более трудоёмким процессом, и не каждый инженер на производстве способен произвести расчеты подобного класса. Широкое же применение CAE пакетов, позволяет производить подобные расчеты практически в автоматизированном режиме. Для этого лишь необходимо на производстве иметь служебную инструкцию с набором действий и требований к проведению математического эксперимента для инженеров. Либо создать систему автоматически производящую данные расчеты.

4. Определение максимального значения  $Pv_{max}$  : исходя из полученных данных о максимальном перепаде температуры, при охлаждении в ходе закалки, площади сечения, и его моменте инерции (таблица 5) необходимо построить график  $Pv$  в зависимости от величины припуска (рисунок 29).

Таблица 5.

Величина припуска $Z$ , мм	Геометрический момент инерции сечения $J$ , м <sup>4</sup>	Площадь сечения $S$ , м <sup>2</sup>	$Pv$ , м <sup>2</sup> /°С
$z_1$	$J_1$	$S_1$	$Pv_1$
...	...	...	...
$z_{n-1}$	$J_{n-1}$	$S_{n-1}$	$Pv_{n-1}$
$z_n$	$J_n$	$S_n$	$Pv_n$
$z_{n+1}$	$J_{n+1}$	$S_{n+1}$	$Pv_{n+1}$

Рисунок 29 – график  $Pv$  в зависимости от величины припуска

Далее, с использованием полиномиальной аппроксимации, необходимо составить уравнение кривой:  $Pv(z) = Az^2 + Bz + C$ , которое описывает поведение искомой функции. После необходимо отыскать локальный максимум функции  $Pv(z)$ , в интервале  $[z_{n-1}; z_{n+1}]$ .

Логичным является округление припуска либо до целого значения, либо до первого знака величины припуска в мм. Потому как припуск является межоперационным, и для обработки фрезерованием представляется «черновым припуском». То есть выдержка точного размера припуска, с точностью более 0.5мм, не представляется рациональным.

5. Определение припуска на деталь: после того как был определен припуск для каждого характерного сечения детали, необходимо определить припуск для всей детали. Для этого необходимо выбрать либо максимальный припуск из возможных, при условии, что для прочих характерных сечений не приведет к значительному снижению  $R_v$ . Либо принять среднее значение из возможных припусков, определив его как среднеарифметическое значение. Полученный таким образом припуск и представляется наиболее подходящим. Хочется отметить возможность применения различной величины припуска для одной детали, однако это представляется не всегда рациональным (технологичным), потому как при написании УП для станка с ЧПУ придётся разграничивать зоны различного припуска и обрабатывать их различными траекториями и методами, что приведет к увеличению времени расчета УП.

#### **4.3. Выводы по разделу**

Остаточные термические напряжения оказывают влияние не деформации не только заготовки, провоцируя неписываемость детали и трудности с закреплением в оснастке, так и на последующую деформацию готовой детали. Предполагается, что описанный выше показатель должен помогать определить оптимальное значение припуска, способствующее минимальному короблению как заготовки так и детали. Ожидаемо, что значение припуска не будет являться целочисленным, а потому исходя из условий технологичности и упрощению процесса изготовления, необходимо будет выбирать либо целочисленным, либо с точностью до первого знака после запятой.

Использование значения припуска полученного по выше изложенной методике не гарантирует полного отсутствия остаточных термических напряжений, или же коробления детали. Также не стоит пренебрегать прочими технологическими приемами по релаксации остаточных напряжений, таких как вылёживание. Предложенный показатель лишь описывает величину припуска обуславливающего оптимальное сочетание геометрических характеристик

сечений и неоднородности теплового поля. А потому является дополнением к технологическим приемам уменьшения коробления, а дополнением.

## ГЛАВА 5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ

### 5.1. Технологический процесс механической обработки рамы переплета фонаря

Из соображений, представленных в п.1.1., механическая обработка производится несколькими механическими операциями, между которыми осуществляются термические операции закалки и искусственного старения.

В ходе первых "обдирочных" операций механической обработки производится вырезка заготовки рамы переплета фонаря из поковки и снятие материала до заготовки с припуском под закалку.

Рама переплета фонаря изготавливается из поковки материала АК6 по ОСТ 1 90073-85 размерами 275x1090x1855 мм. Масса поковки составляет 1530кг. Допуск на предельные отклонения размеров на обрабатываемые толщины  $-0,3/+0,2$ . Допуск на поверхности рамы переплета фонаря выходящих на теоретический контур  $-0,5/+0,5$ . Обработка производится на универсальном пятикоординатном обрабатывающем центре.

Первоначально поковка подвергается двум операциям механической обработки для формирования поверхностей без остатков "черноты" (рисунок 30), и для достижения требуемой шероховатости  $\sqrt{Ra}3.2$ , необходимой для проведения неразрушающего контроля.

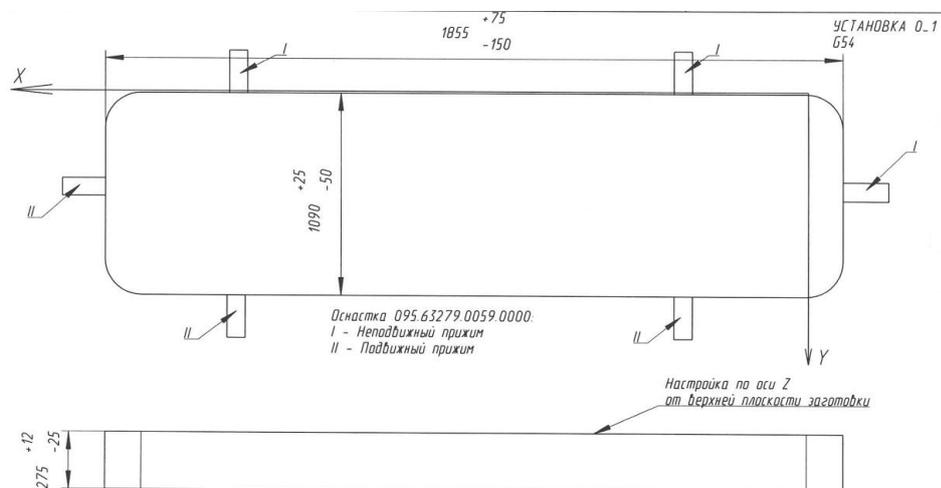


Рисунок 30 – Эскиз установки поковки на стол станка, для создания плоскости.



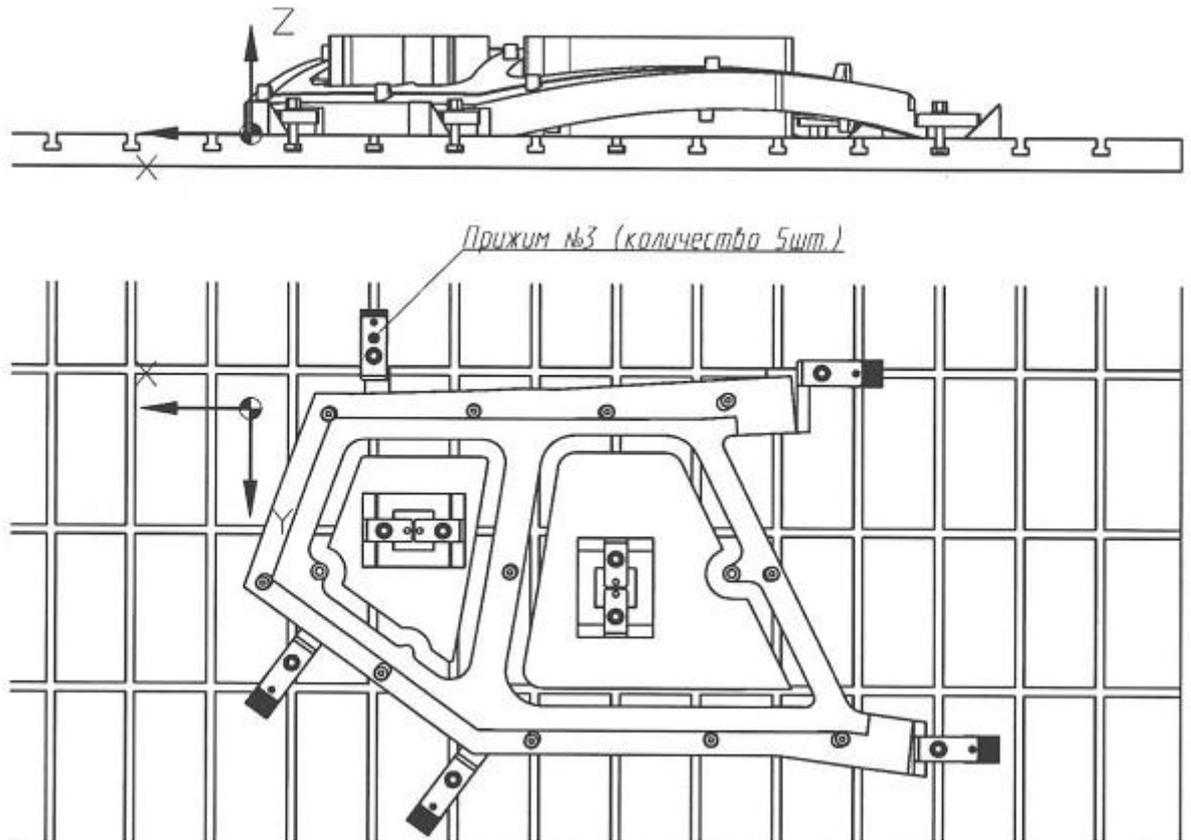


Рисунок 32 – Эскиз установки заготовки на столе станка перед финишной обработкой.

Затем, заготовка рамы переплета фонаря и образцы-свидетели поступают в цех термической обработки. После закалки и старения заготовка возвращается в механообрабатывающий цех для выполнения окончательной обработки. Образцы-свидетели поступают в лабораторию для подтверждения необходимых механических характеристик. Далее, заготовка устанавливается на стол станка для механообработки (рисунок 33). Обработка проходит в 4 установа (4 операции фрезерования).

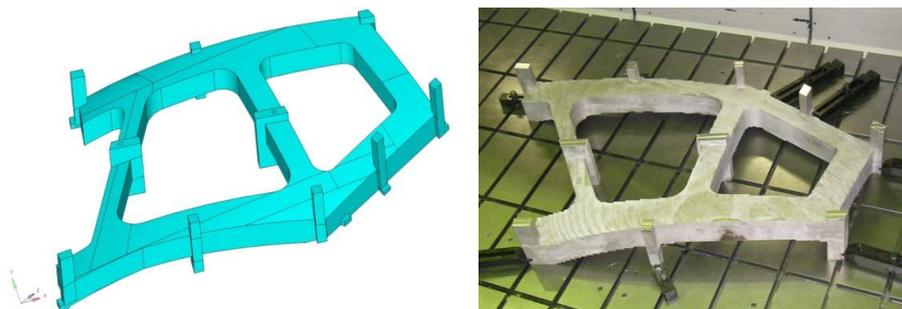


Рисунок 33 – 3D модель заготовки и заготовка на столе станка.

В первых двух установках производится удаление материала для снижения припуска, массы заготовки, а также для возможности установки на технологические приспособления (стойки) (рисунок 34).



Рисунок 34 – Рама переплета установленная на стойках в ходе обработки.

Образованные за первые два установка поверхности должны были позволить в последующих 2-х операциях механической обработки произвести точное позиционирование заготовки (рисунок 34).

В ходе последующих операций механической обработки производится удаления припуска 2мм и 0,1мм, достигается заданная шероховатость. Возникающие в ходе удаления материала перераспределение остаточных напряжений приводят к деформации детали. Поэтому применяется постепенный подбор припуска для стенок и полок рамы (внешний вид готовой рамы с силовыми элементами представлен на рисунке 35).



Рисунок 35 – Рама переплета фонаря после изготовления.

Это позволяет несколько снизить отклонения готовой детали от геометрической модели, но зачастую деталь выходит вне поля допуска. Для увеличения точности также применяется операция рихтовки. Применяемые ухищрения не всегда позволяют изготавливать раму переплета фонаря с достаточной точностью.

После изготовления рама переплета фонаря проходит контроль геометрии (обводов теоретического контура и толщин стенок) на контрольно-измерительной машине AcuraZeiss.

Изготовление рамы переплета фонаря по представленной технологии приводило к отклонениям геометрии рамы выше допусковых по техническим условиям. Отклонения достигали  $+0,9$  мм от теоретического контура и занижение стенок более  $-0,3/+0,2$ . Это не позволяло использовать детали для сборки носового отсека самолета. Введенные операции рихтовки и ручной доводки, также не позволяли достигнуть желаемого эффекта.

Во избежание занижения толщины стенок, написание управляющих программ производилось не на середину поля допуска, а на максимальное значение  $+0,2$  мм от толщины стенки переплета фонаря. После проведения обработки на станке проводилось измерение толщины стенок, и в случае выхода толщины стенок за пределы поля допуска использовались дополнительно написанные управляющие программы, которые итерационно с шагом в  $0,1$  мм позволяли снимать материал для достижения требуемой толщины стенок рамы переплета фонаря.

Таким образом, вводились дополнительные операции, увеличивающие стоимость изготовления детали. При этом изготовить "годную" деталь, то есть деталь, соответствующую конструкторской документации, не всегда получалось.

При обработке резанием возможно отклонение от требуемой теоретической поверхности по нескольким причинам: - вследствие затягивания или отгибания тонкой стенки фрезой при обработке; - вследствие формирования остаточных напряжений и, следовательно, остаточных деформаций от самого резания материала; - вследствие технологической наследственности.

Для предотвращения затягивания/отклонения стенки детали под действием силы резания, на финишных операциях обработка производилась на пониженных режимах при съеме материала 0,2мм, что позволяет практически полностью исключить возможность влияния на поводки рамы переплета фонаря этим фактором.

Обработка резанием в значительной мере влияет только на остаточные напряжения и деформации в поверхностном слое материала, глубиной примерно до 0,2 мм. Подобные напряжения коренным образом не способны привести к столь большим отклонениям от исходной геометрии.

Деформации, возникающие вследствие технологической наследственности, остаются единственно возможной причиной приводящей к поводкам детали. А удаление материала в процессе механической обработки приводит к перераспределению остаточных напряжений и ведет к образованию деформаций, которые практически невозможно предугадать.

Во избежание появления подобных эффектов, ранее, применялось вылёживание заготовки после термической обработки в течение 3-4 месяцев. Происходящие при этом процессы приводили к релаксации напряжений и благоприятно влияли на геометрию конечной детали. Это значительно увеличивало цикл изготовления детали: с одной недели до 4,5 месяцев. Подобное увеличение цикла изготовления детали приводит к необходимости создания больших площадей для хранения заготовок. Это, в конечном счете, еще больше увеличивало конечную стоимость детали.

## **5.2. Закалка заготовки рамы переплёта фонаря**

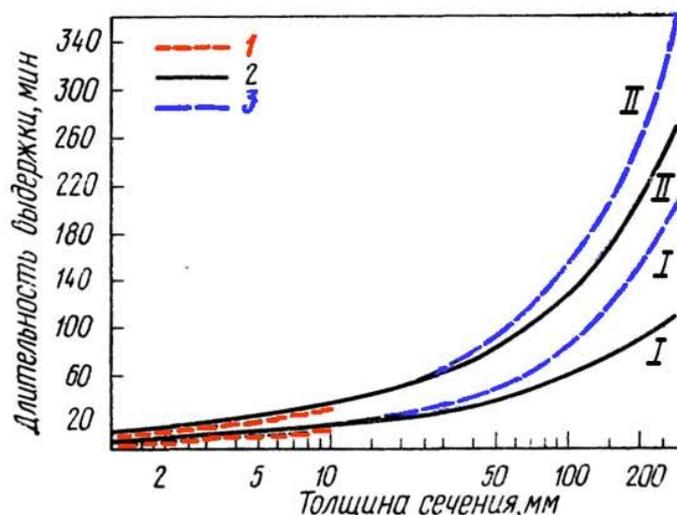
Закалка рамы переплета фонаря производится по режимам, представленным в таблице 6 [55]. Старение при 20 °С (естественное старение) сплава АК6 обеспечивает высокую пластичность, при пониженных прочностных свойства по сравнению с искусственным старением.

Таблица 6 – Режимы термической обработки

Сплав	Вид полуфабриката	Температура нагрева под закалку, °С	Вид старения	Температура старения, °С	Время старения, ч
АК6 АК6ч	Поковки, штамповки, прессованные, полуфабрикаты	505-525	Естественное Т	Комнатная	>96
			Искусственное Т1	1555-165	10-15
			Искусственное Т2	195-205	11-13

Режим Т1 применяют для высокой прочности и удовлетворительной пластичности. Возможно сокращение режима Т1: 170-175°С, 3ч. Гарантируемые механические свойства сплава приведены в таблице 6. При изготовлении рамы переплета фонаря применяется старения по Т1.

Время нагрева и выдержки можно определить исходя из рисунка 36. На производстве применяется нагрев в воздушной электропечи. Время нагрева составляет 2 часа, время выдержки составляет 3 часа [56]. Таким образом, общее время нагрева и выдержки под закалку составляет 5 часов.



I — нагрев в селитровой ванне; II — нагрев в воздушной электропечи; 1 — плакированные листы; 2 — неплакированные полуфабрикаты, кроме поковок и штамповок; 3 — поковки и штамповки

Рисунок 36 – Зависимость длительности выдержки при нагреве под закалку от толщины сечения и вида полуфабриката.

В связи с проблемой изменения геометрии детали было принято решение об оценке деформации заготовки после закалки. Для этого на деталь были нанесены точки. Затем, была выбрана базовая плоскость, и произведены измерения координат контрольных точек до и после закалки с помощью КИМ (контрольно-измерительная машина). Результаты измерений, в виде векторов направления перемещения точек и величины перемещения представлены на рисунке 37.

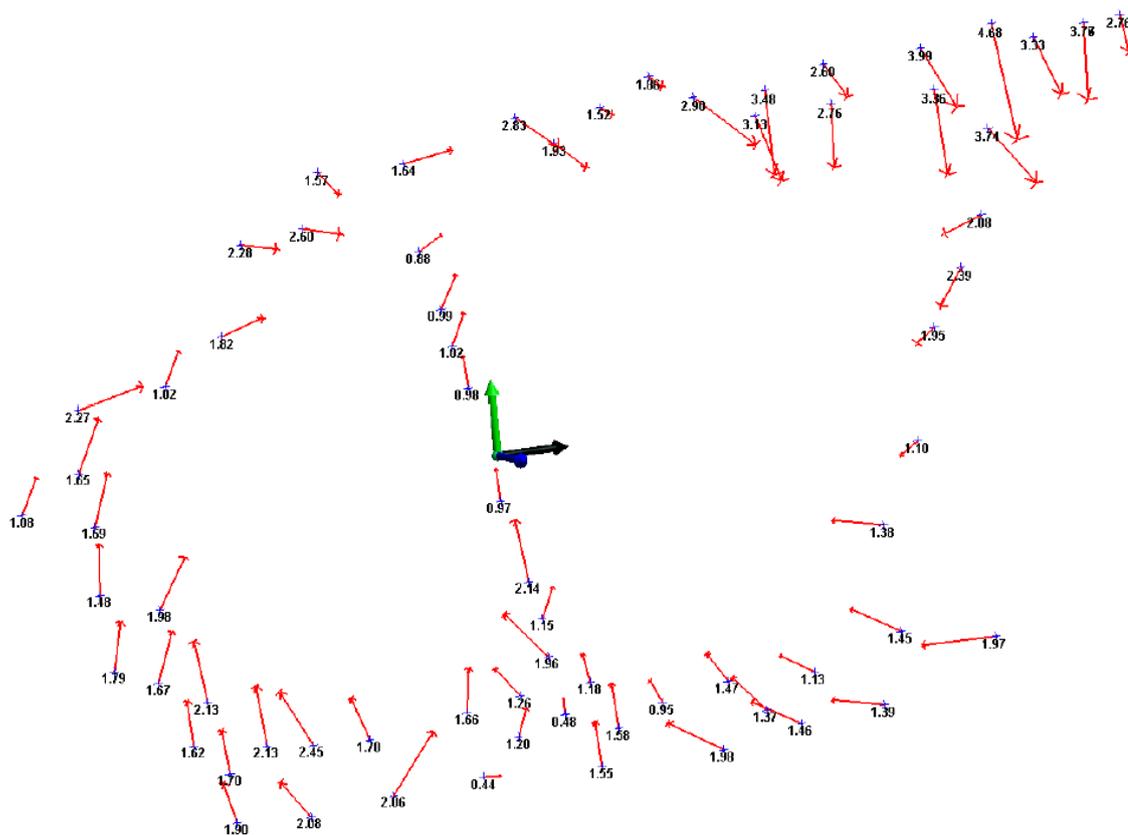


Рисунок 37 – Перемещения контрольных точек возникших в результате закалки.

Проведенные измерения показывают значительную деформацию заготовки после закалки. Искажение формы заготовки приводили к проблемам при базировании и вписывании детали. Это значительно повышало трудоемкость последующих операций фрезерования, увеличивало цикл производства, а изготовленная деталь зачастую не отвечала требованиям конструкторской документации, потому оформлялись запросы в КБ на разрешение к установке в отсек. Запросы не всегда положительно утверждались, и увеличивали продолжительность сборочных работ.

### 5.3. Результаты изменения технологического процесса изготовления рамы переплета фонаря

На раме переплёта выделялись характерные сечения, на которые назначался равномерный припуск в размере в интервале 3-9мм (рисунок 38).

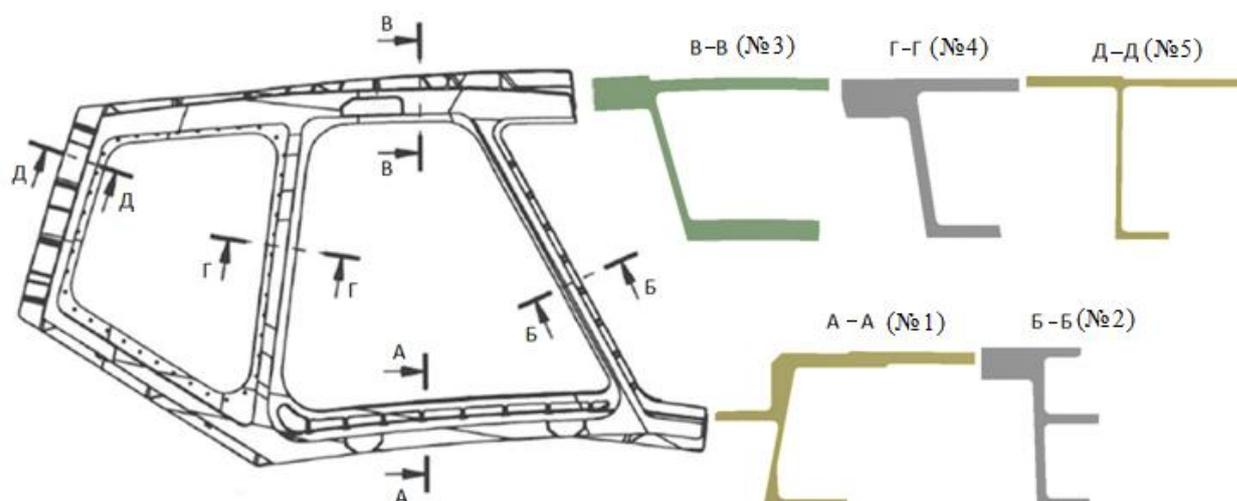
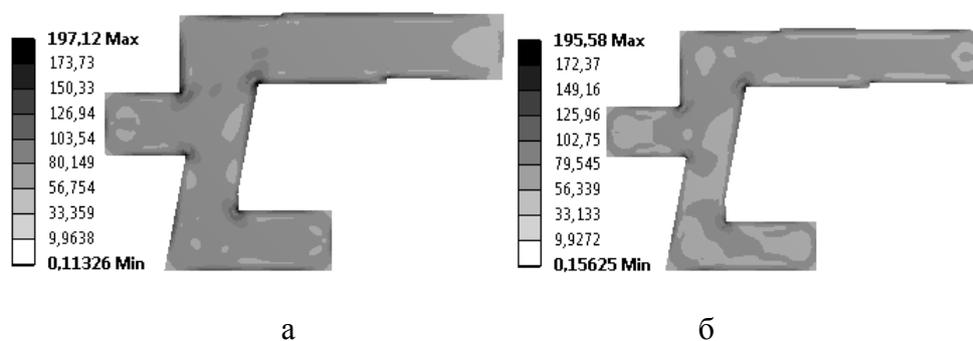


Рисунок 38 – Эскиз рамы переплета фонаря и характерных сечений.

Граничные и начальные условия, принимались аналогичными расчету, представленному в п.3.3 данной работы. Физико-механические свойства материала АК6 и коэффициент теплообмена принимались зависимыми от температуры. Результаты моделирования представлены на рисунках 39-43. Как можно видеть, как и в п.3.3, с уменьшением толщины заготовки (за счет снижения припуска) уменьшаются и остаточные напряжения.



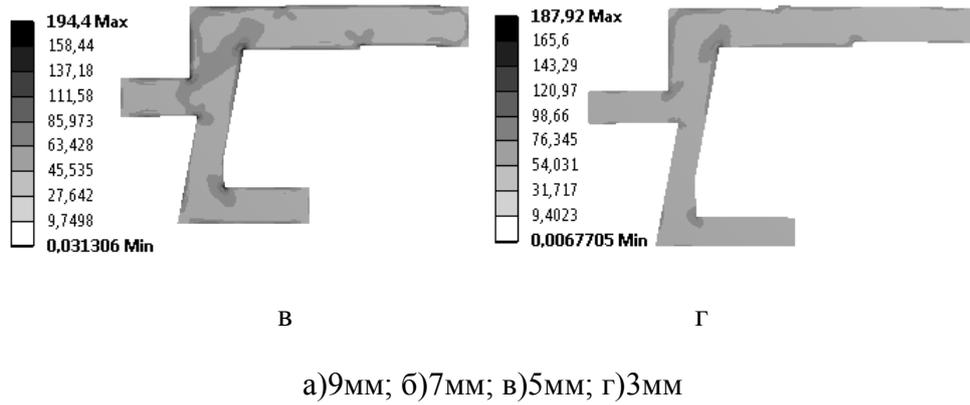


Рисунок 39 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в сечении №1 с различным припуском.

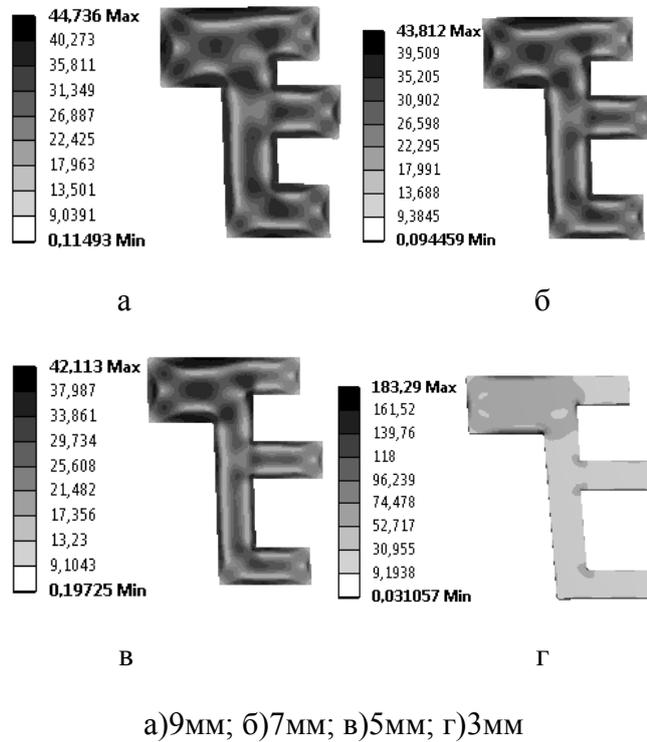
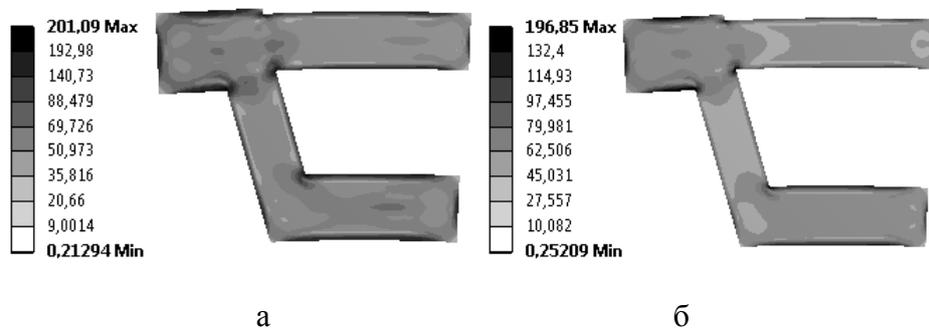


Рисунок 40 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в сечении №2 с различным припуском.



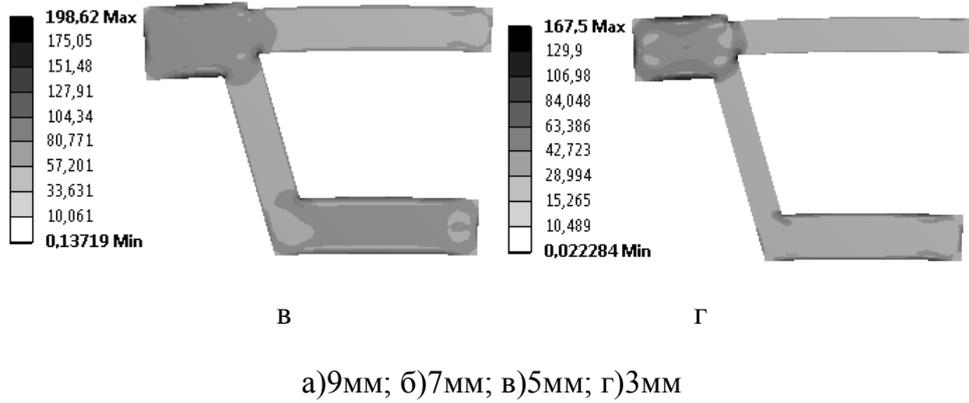


Рисунок 41 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в сечении №3с различным припуском.

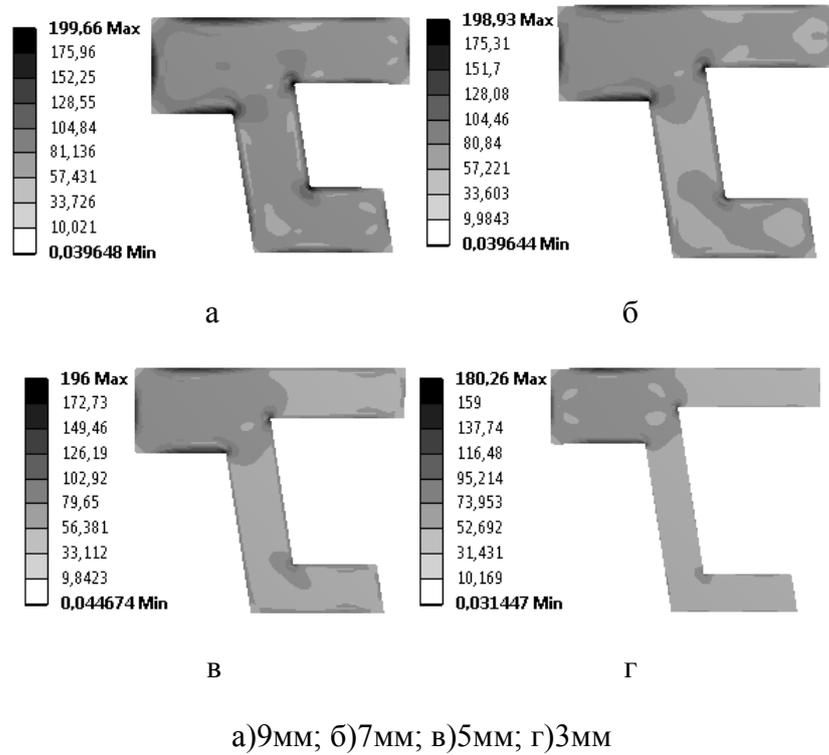
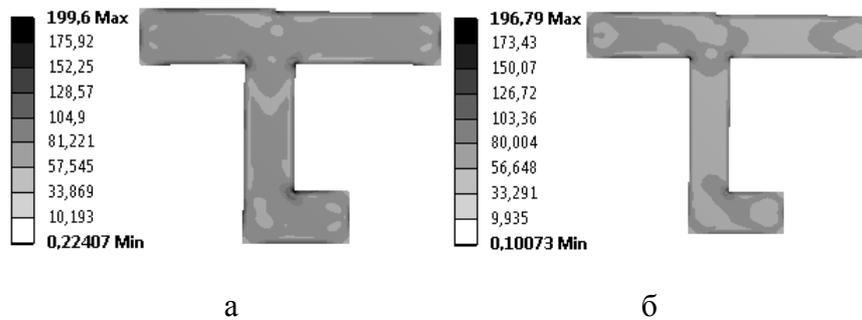


Рисунок 42 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в сечении №4с различным припуском.



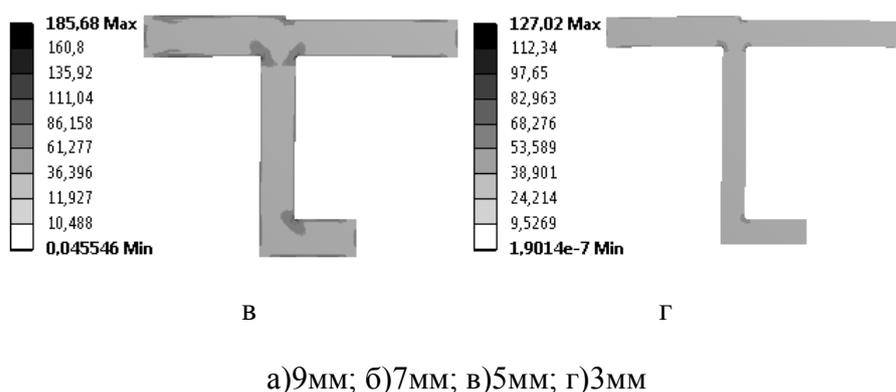
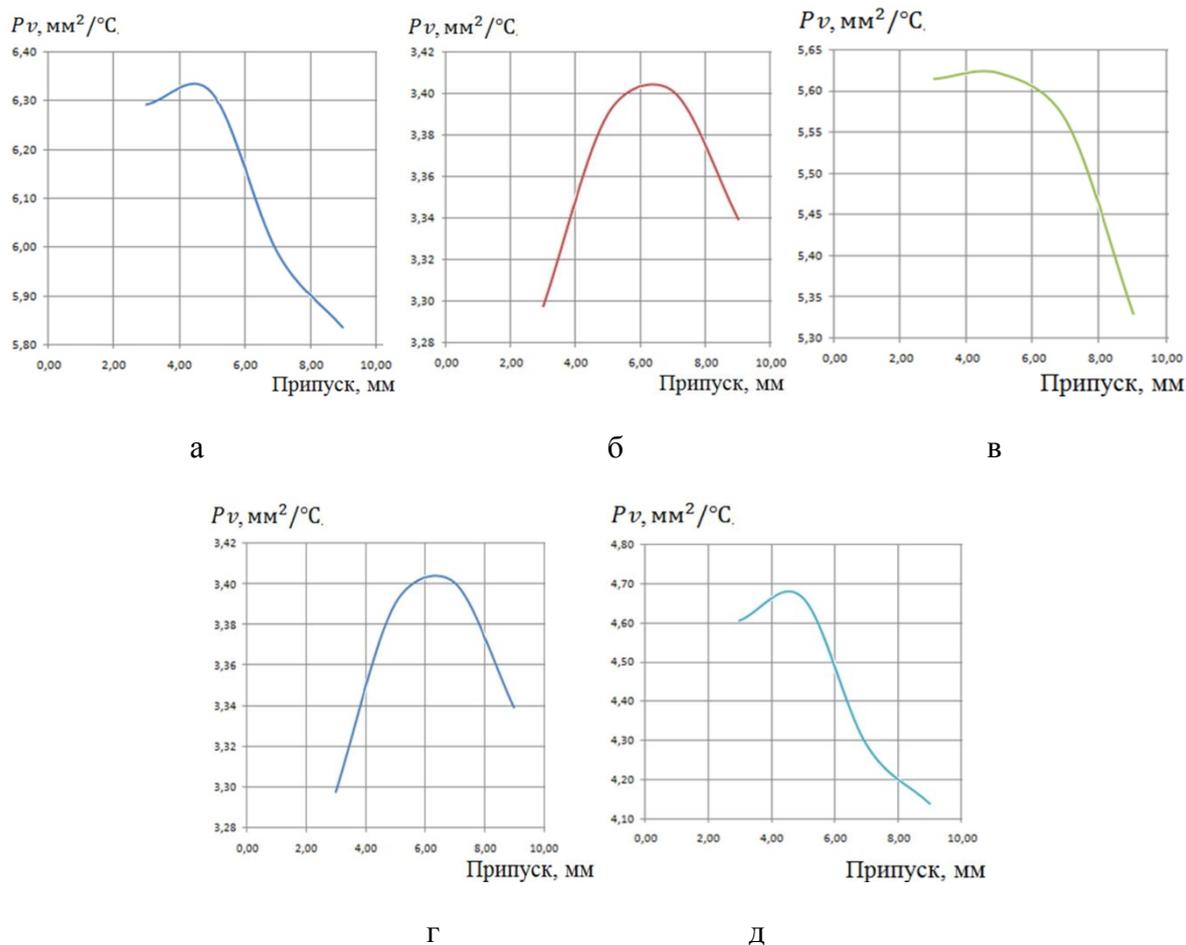


Рисунок 43 –Эквивалентные напряжения по Мизесу в сечении №5с различным припуском.

Для каждой заготовки производился расчет согласно предложенной автором новой зависимости (13). Результаты для прямоугольного сечения заготовки размерами 100x120мм, используемого ранее на производстве, составляют  $Pv_y = 3,26 \text{ мм}^2/\text{°C}$ ;  $Pv_x = 2,27 \text{ мм}^2/\text{°C}$  ( $Pv_y$  – погружение вдоль размера 120 мм;  $Pv_x$  – погружение вдоль размера 100мм). Результаты для характерных сечений рамы показаны на рисунке 44. Как можно видеть ни один из равномерных припуском не демонстрирует значение  $Pv$  (значение  $Pv$  для сечений заготовки с равномерным припуском приводится без коэффициента в виду фиксированного положения сечений в детали, и невозможности их взаимного вращения) меньше чем у заготовки с прямоугольным сечением.

Если проанализировать полученные графики  $Pv$  (рисунок 44), то можно заметить, что они все обладают явным максимумом значения  $Pv$ , соответствующего припуску 4,5-5,5мм в зависимости от сечения. Таким образом, получаем диапазон допустимых припусков. Однако назначение припуска ниже 5,5 мм является нежелательным, из-за снижения жесткости заготовки. Таким образом, округляя припуск 5,5 мм, получаем рабочее значение припуска в 6мм.



а) сечение №1; б) сечение №2; в) сечение №3; г) сечение №4; д) сечение №5

Рисунок 44 – Значение  $Pv$  в зависимости от величины припуска.

Округлять величину расчетного припуска до целочисленного значения является предпочтительным ввиду таких факторов как: наличия дефектного слоя возникающего при закалке; необходимость выполнения как черновых, так и чистовых операций фрезерования; необходимость вписывания детали в деформированную после закалки заготовку.

Далее производилось изменение управляющих программ для станков с ЧПУ. Обработка на эквидистанту на бмм производилось заодно с операцией вырезки заготовки из поковки. Таким образом, сохранялось общее количество операций механической обработки, и не увеличило количества операций фрезерования. Далее производилась верификация управляющих программ с целью определения столкновений движущихся частей станка и заготовки, а также проверки на наличие зарезов заготовки. Верификация проводилась в программе Vericut,

полученная в результате заготовка представлена на рисунке 45. В виду снижения массы заготовки (с 200кг до 114кг), и ожидаемого снижения уровня поволодок, на поверхности заготовки были предусмотрены поверхности базирования и установки в приспособления быстрого базирования [57,58].



Рисунок 45 – 3D модель заготовки с равномерным припуском 6 мм.

Максимальная толщина новой заготовки составила 60мм, согласно рисунку 37, время выдержки сократилось до 120 минут, с учетом выхода печи на режим – 4часа, что на час меньше времени выдержки предыдущей заготовки.

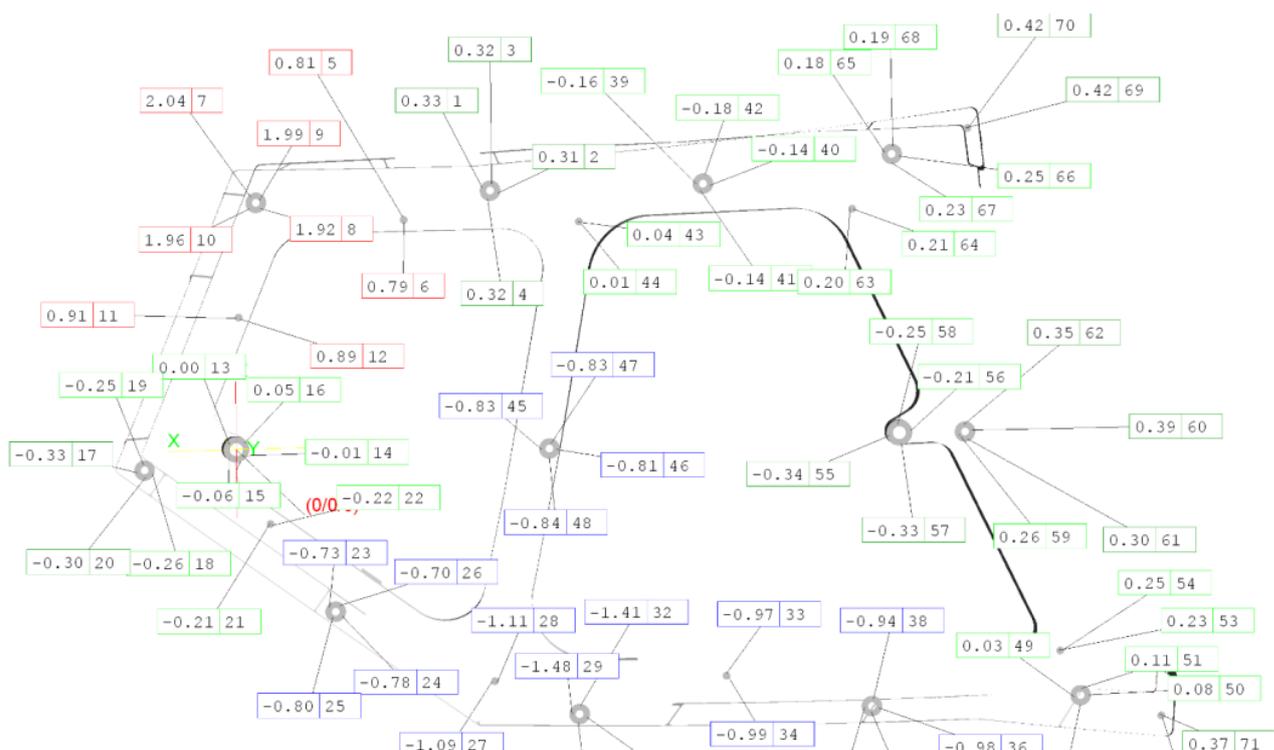
Также было решено провести оценку величины поволодок новой заготовки, для этого на поверхности заготовки были сделаны цилиндрические выступы (рисунок 46-а). Измерение координат центров торцов данных цилиндров производилось до и после закалки, карта отклонений показана на рисунке 46-б.



а

б

в



Г

Рисунок 46 – а) выступающие цилиндры в качестве контрольных точек б) вид сечения рамы переплета фонаря в) партия заготовок с равномерным припуском на поддоне, после закалки г) результаты измерения новой заготовки с равномерным припуском.

Как можно видеть максимальное отклонение составило +2,04мм. Максимальное же отклонение в заготовке до изменения было 4,8мм. Как можно видеть, поводки после закалки заготовки снизились более чем в два раза.

Далее рама переплета фонаря проходила последующие операции чернового и чистового фрезерования аналогичные тем, что применялись до изменения заготовки. После выполнения чистовых операций, завершения этапа механической обработки, рама переплета фонаря проходила необходимый контроль геометрии и сравнивалась с 3D моделью. Результаты сравнения представлены на рисунке 47.

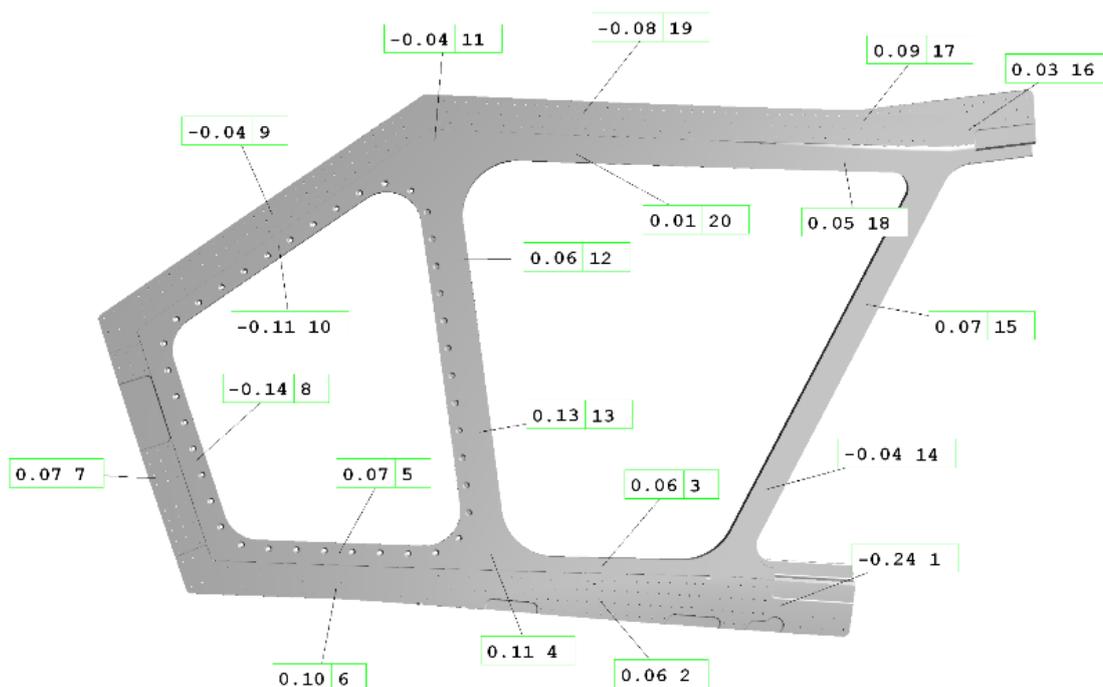


Рисунок 47 – Отклонения готовой рамы от электронной модели.

В целом можно констатировать снижение отклонений геометрии готовой детали от 3D модели. Уровень деформаций заготовки не повлиял на вписываемость детали в заготовку, припуск составлял большее значение, нежели поводки заготовки (максимальное отклонение 2,04мм). Также заготовка без затруднений фиксируется в приспособлениях в виду снижения поволок заготовки. Предельно допустимые отклонения на аэродинамические обводы составляют  $\pm 0,5$ мм, предельные отклонения толщин  $+0,2/-0,3$ мм. Контрольная операция по измерению отклонений геометрии рамы от электронной модели проводилась на контрольно-измерительной машине AcuraZeiss. Полученные отклонения не превышают  $+0,1/-0,24$ мм, что удовлетворяет требованиям точности изготовления детали.

Проведенные изменения технологического процесса позволили производить раму переплета фонаря с должным качеством, отказаться от дополнительных механических операций по постепенному удалению припуска (для обеспечения не занижения стенок) и операций рихтовки, снизить время выдержки в электропечи

для нагрева под закалку. Это позволило снизить затраты и время производства рамы переплета фонаря, исключая брак при производстве.

#### **5.4. Выводы по разделу**

Получено практическое подтверждение верности предложенного показателя  $R_v$ , как меры склонности сечения заготовки к поводкам возникающим в результате закалки, которое позволило определить оптимальный припуск под закалку и провести изменение технологического процесса. Проведенные изменения позволили производить раму переплета фонаря с должным качеством. Отказаться от дополнительных операций механической обработки по постепенному обнижению (для обеспечения не занижения стенок рамы) и операций рихтовки. Снижение припуска позволило снизить массу заготовки, её максимальную толщину и как следствие снизить время выдержки в закалочной электропечи. Это позволило снизить время и затраты на производство рамы переплета фонаря, исключая брак при производстве.

## Общие результаты и выводы

1. Определены параметры математического моделирования в конечно-элементном пакете ANSYS, позволяющие достигнуть приемлемой точности решения связанной задачи закалки. Разработана процедура для конечно-элементного пакета ANSYS, позволяющая моделировать процесс погружения детали в закалочную среду. Определены параметры решателя ANSYS для решения задач с большими температурными градиентами.

2. Выявлена взаимосвязь уровня деформации заготовки при закалке с направлением погружения. Определены предпочтительные направления погружения для крупногабаритных авиационных деталей сложной геометрии, – вдоль наибольшей жесткости сечения заготовки в закалочную среду.

3. Определено влияние неравномерности тепловых полей при закалке на остаточные напряжения. Предложена методика оценки влияния размера припуска на уровень внутренних остаточных напряжений, по характерным сечениям сложной крупногабаритной детали. Выработаны рекомендации по выбору припуска под закалку с целью снижения поводок рамы фонаря.

4. Разработан метод определения оптимальных припусков перед закалкой с учетом факторов жесткости сечения, момента инерции и неоднородности теплового поля для крупногабаритных авиационных деталей, позволяющий, в итоге, назначать наиболее эффективное значение припуска под закалку, составляющее для рамы переплета фонаря 6мм.

5. Разработан новый технологический процесс, позволяющий исключить операции рихтовки и дополнительной механической обработки по постепенному «обнижению» стенок рамы переплета фонаря и обеспечено производство детали в рамках допустимых техническими условиями геометрических отклонений.

6. В результате изменения технологии изготовления крупногабаритной детали двойной кривизны удалось: сократить время выдержки заготовки в закалочной печи на 60 минут; снизить поводки заготовки в результате закалки с 4,8 до 2,04 мм. Отклонения теоретического контура готовой детали снизились с 0,8мм до

0,14мм (при допустимых +/-0,5 мм). Отклонения на толщину стенок снизились с +0,3/-0,3 мм до +0,1/-0,1 мм (при допустимых +0,2/-0,3 мм).

7. В ходе изменения технологии вес заготовки под закалку снизился с 200 кг до 114 кг за счет применения равномерного припуска 6мм по всей поверхности рамы переплета фонаря, взамен неравномерного припуска (с напуском) с максимальным значением в 18 мм.

8. Снизилось использование дорогостоящего металлорежущего инструмента на 10% за счет уменьшения припуска, подвергаемого удалению после закалки. Снижено машинное время в черновых операциях при обдирке незакаленного материала.

## Список литературы

1. Проектирование частей самолёта / Л.И. Сутугин. — М.: Оборонгиз, 1947, — 644с.
2. Расчёт самолёта на прочность / С.Н. Кан, И.А. Свердлов. — М.: Машиностроение, 1966.—520 с.
3. Расчёт самолёта на прочность / В.М. Стригунов — М.: Машиностроение, 1973.—328 с.
4. Конструкция самолётов / О.А. Гребеньков — М.: Машиностроение, 1984.— 240 с.
5. Конструкция и прочность самолетов / В.Н. Зайцев, В.Л. Рудаков. — изд. 2-е — Киев : Вища школа, 1978. —488 с.
6. Термическая обработка сплавов: справочник / И.В. Фиргер. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние., 1982.—304 с.
7. Термическая обработка на металлургических заводах / В.Б. Райцес. —М. : Металлургия, 1971. — 248 с.
8. Расчет припусков на обработку в машиностроении / В.М. Кован. — М. : МАШГИЗ, 1953. — 202 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Косилова А.Г., Р.К. Мещеряков. — М. : Машиностроение, 1986. — т 1.
10. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении / Я.М. Радкевич, А.Г. Тимирязев, А.Г. Стирхиладзе, М.С. Островский. — М. : Высшая школа, 2004. — 272 с.
11. Размерный анализ технологических процессов обработки заготовок: учебное пособие / М.А. Белов, А.Н Унянин. — Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 1997. — 148 с.
12. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. — Минск : Наука и техника, 1977. — 256 с.

13. Алюминиевые сплавы: справочник / под ред. академика И.Н. Фридляндера — Киев : Коминтех, 2005. — 365 с.
14. Неустановившиеся температурные напряжения / Г. Паркус — М.: Физматгиз, 1963. — 252 с.
15. Термомеханическая обработка алюминиевых сплавов / М.Х. Рабинович — М. : Машиностроение, 1972. — 169 с.
16. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. — М. : МАШГИЗ, 1963. — 223 с.
- 17 Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справ. пособ. / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин и др. — Киев : Наукова думка, 1981. — 581 с.
18. Численные методы в теории упругости и пластичности: учеб. пособие. / Б.Е. Победря — 2-е изд. — М. : Изд-во МГУ, 1995. — 366 с.
19. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести: справ. пособ. / Г.С. Писаренко, Н.С. Можаровский — Киев : Наукова думка, 1981. — 496 с.
20. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.И. Данилов и др. — Новосибирск : Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. — 255 с.
21. Основы анализа конструкций в Ansys / А.В. Конюхов — Казань : Изд-во КГУ, 2001. — 102 с.
22. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко изд. 3-е перераб. и доп. — М. : Энергия, 1975. — 488 с.
23. Техническая термодинамика и теплопередача : учебн. пособие для неэнергетических специальностей вузов / В.В. Нащокин — М. : Высшая школа, 1975. — 496 с.
24. Теория теплообмена: учебник для вузов / А.И. Леонтьева — М. : Высшая школа, 1979. — 495 с.
25. Нестационарный теплообмен / В.К. Кошкин, Э.К. Калинин, С.А. Дрейцер, С.А. Ярхо — М. : Машиностроение, 1973. — 328 с.

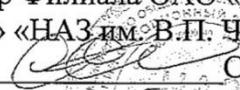
26. Теория теплопроводности / А.В. Лыков — М. : Высшая школа, 1967. — 600 с.
27. Техническая термодинамика / В.И. Крутов — М. : Высшая школа, 1981. — 434 с.
28. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев — М. : Госуд. Изд-во технико-теоретической лит-ры, 1954. — 408 с.
29. Основы теплопередачи / М.А. Михеев — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
30. Concepts and Application of Finite Element Analysis / — New York : John Wiley & Sons, 1981—784 p.
31. Conduction of Heat in Solids / — London : Oxford University Press, 1959—520p.
32. Bachurin, A.S. Analysis of Residual Thermal Stresses in Composite Materials / A.S. Bachurin // Graduate and Postgraduate students scientific conference «Siberian Innovative Technologies» — 2011.—10 p.
33. Бачурин, А.С. Влияние закалки на остаточные деформации деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов/ А.С. Бачурин, К.Н. Бобин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // Вестник СибГАУ, 2013. № 3. – С. 119.
34. Бачурин, А.С. Анализ остаточных термических напряжений в композиционном материале методом конечных элементов/ А.С. Бачурин, Е.Г. Подружин // Труды XII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.»- Новосибирск: НГТУ, 2011. – С. 493.
35. Введение в термо-упругость / А.Д. Коваленко — Киев : Наукова думка, 1965. — 204 с.
36. Термоупругость тел при переменных коэффициентах теплоотдачи : монография / Я.С. Подстригач, Ю.М. Коляно и др. — Киев : Наукова думка, 1977. — 155 с.
37. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо — М. : Metallurgy, 1979. — 640 с.
38. Variational Methods in Elasticity and Plasticity / K. Washizu — New York : Pergamon Press, 1982. — 630 с.

39. Ansys Mechanical – A powerfull nonlinear simulation tool / G.R. Bhashyam — Canonsburg : Ansys Inc, 2002. — 39 с.
40. Finite Elements of Nonlinear Continua—New York : McGraw-Hill Book Company, 1972 — 448 p.
41. Бачурин, А.С. Оценка точности решения нестационарных тепловых задач и расчет процесса закалки с постепенным погружением в закалочную среду методом конечных элементов/ А.С. Бачурин, Н.В. Курлаев, А.Ю. Слюняев // Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.»- Новосибирск: НГТУ, 2012. – С. 64.
42. AnsysInc. ThermalAnalysisGuide / AnsysInc. — Canonsburg : AnsysInc., 2007. — 88 p.
43. Ansys Inc Meshing Help / Ansys Inc. — Canonsburg, 2007. – 70 p.
44. Ansys Inc. ANSYS Mechanical APDL and Mechanical Application Theory reference. — Canonsburg : Ansys Inc., 2010. — 1162 p.
45. PLM Урал- Делкам Урал Применение SYSWELD для моделирования закалки в 2D постановке [Электронный ресурс] / PLM Урал- Делкам Урал // Делкам Урал. — 2013. — Режим доступа : [http://plmural.ru/cae/tehnologicheskii\\_analiz/sysweld\\_modelirovanie\\_zakalki](http://plmural.ru/cae/tehnologicheskii_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki).
46. Ansys Inc. Programmers Manual for ANSYS / Ansys Inc. –Canonsburg : Ansys Inc., 2007. – 312 p.
47. Ansys Inc. ANSYS Theory Reference/ Ansys Inc. — Canonsburg : Ansys Inc., 2004. — 1067 с.
48. Engineering analysis with ANSYS software / S. Nakasone, Y. Yoshimoto — Burlington : MPG Books , 2006. — 473 с.
49. Ansys Inc. Engineering data help / Ansys Inc. — Canonsburg : Ansys Inc., 2007. — 46 с.
50. Бачурин, А.С. Численное моделирование влияния припуска на величину остаточных напряжений в деталях летательных аппаратов после закалки/ А.С. Бачурин, К.Н. Бобин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // Вестник СибГАУ, 2013. № 3. – С. 123.

51. Основы конструирования отливок. Параметры точности и припуски на механическую обработку / В.Н. Моргунов — Пенза : Издательство ПГУ, 2004. — 146 с.
52. Надёжность летательных аппаратов / Л.И. Волков, А.М. Шишкевич. — М.: Высшая школа, 1975, — 296с., ил.
53. Бачурин, А.С. Влияние технологического припуска на остаточные напряжения деталей самолета / А.С. Бачурин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // VII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения».- Томск: ТПУ, 2013. – С. 279.
54. Численные методы оптимизации: учеб. пособ. / В.И. Рейзлин — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 105 с.
55. Цветные металлы и сплавы: справочник / Е.Н. Штанов, И.А. Штанова — Н. Новгород : Вента-2, 2001. — 278 с.
56. Закалка сплавов / А.Н.Розанов, А.И. Дашковский — М. : Издательство МИФИ, 1956. — 66 с.
57. Гумбатова, С.А. Рационализация технологического процесса изготовления переплета фонаря кабины самолёта SSJ-100/ С.А. Гумбатова, А.С. Бачурин, Н.В. Курлаев// VII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» - Томск : ТПУ, 2013. – С. 281.
58. Быстрая переналадка: Революционная технология оптимизации производства / С. Синго — М. : Альпина Бизнес Букс, 2006. — 344 с.

# Приложение

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора –  
директор Филиала ОАО «Компания  
«Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова»  
С.А. Смирнов  
« 10 » октября 2013 г.**АКТ**

внедрение результатов диссертационной работы  
Бачурина Александра Сергеевича на тему «ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГО-  
ТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ МЕЖОПЕРАЦИОННЫХ ПРИПУСКОВ» в производство  
Филиал ОАО «Компания «Сухой» «НАЗ им. В.П.Чкалова»

Комиссия в составе заместителя главного технолога по оптимизации техноло-  
гических процессов Н.В.Ильина, начальника бюро развития САМ-технологий  
Н.В.Варавиной, ведущего инженера-технолога отдела 84 В.В.Федоровой составили  
настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы использованы при  
производстве деталей переплета фонаря SSJ-100 в цехе 103 в виде:

- технологических рекомендаций по назначению равномерного межопера-  
ционного припуска под закалку на детали механообрабатывающего производства и  
определению предпочтительного направления погружения закаляемой заготовки со  
сложной геометрией, в охлаждающую среду, на основании предложенного в работе  
оптимизационного показателя;

- методики поиска оптимальных значений припуска, исходя из предложенного  
в диссертации показателя, для снижения величины поволоок заготовки после закал-  
ки;

- процедуры на языке APDL для ПО ANSYS, позволяющей проводить моде-  
лирование закалки с учетом погружения детали в охлаждающую среду.

Использование результатов работы позволило повысить точность изготовле-  
ния крупногабаритных авиационных деталей, снизить трудоёмкость их изготовле-  
ния за счет снижения доводочных работ и выбора оптимального припуска.

Ведущий инженер-технолог  
отдела 84



В.В. Федорова

Начальник бюро развития  
САМ-технологий



Н.В. Варавина

Заместитель главного технолога  
по оптимизации технологических процессов



Н.В. Ильин

Примечание: Акт не является основанием для перечисления денежных средств.