

На правах рукописи



Бачурин Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖОПЕРАЦИОННОГО
ПРИПУСКА ПОД ТЕРМИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ НА
ТОЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРКАСНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05.07.02

Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

Работа выполнена на кафедре самолето- и вертолетостроения ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Курлаев Николай Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой самолето- и вертолетостроения
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Официальные оппоненты: **Хаймович Александр Исаакович**,
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой
технологий производства двигателей ФГАОУ ВО
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева»
(Самарский университет), г. Самара

Кривенок Антон Александрович,
кандидат технических наук, ведущий инженер
научно-производственного бюро управления
технического развития филиала ПАО «Компания
«Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»,
г. Комсомольск-на-Амуре

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
г. Иркутск

Защита состоится «17» марта 2021 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.06 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте www.knastu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверены печатью учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.092.06

Автореферат разослан « » января 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.092.06

кандидат физико-математических наук



Д.А. Потяхин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное механообрабатывающее оборудование на предприятиях авиационной отрасли позволяет изготавливать крупногабаритные каркасные детали летательных аппаратов (ЛА), а металлургическая промышленность в состоянии обеспечить производство заготовок необходимых размеров. Механообрабатывающее оборудование позволяет проводить обработку резанием с точностью до $\pm 0,001$ мм, что обеспечивает покрытие всего диапазона возможных отклонений, разрешенных при производстве деталей ЛА.

Однако остается острой проблема обеспечения точности изготовления крупногабаритных цельнофрезерованных каркасных деталей сложной геометрической формы. Нередки случаи, когда полностью готовая деталь, прошедшая все циклы изготовления, признается не годной для сборочного производства ввиду значительных отклонений от требуемой геометрии.

Причина, по которой детали после изготовления на столь точном оборудовании оказываются вне допуска, – остаточные напряжения, возникшие в ходе производства заготовки. При производстве крупногабаритных каркасных деталей ЛА заготовка проходит множество операций механической обработки резанием, между которыми присутствует термическая обработка. Это обусловлено невозможностью термообработки заготовки большой толщины, так как материал имеет ограничение глубины прокаливаемости. Заготовка под термообработку предварительно вырезается из крупногабаритной поковки с припуском, величина которого должна позволить прокалить заготовку на всю глубину. 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. Закалочные напряжения оказывают влияние на точность последующих операций обработки резанием. Механическая обработка резанием сопровождается снятием слоёв материала и нарушением равновесного напряженно-деформированного состояния заготовки, что приводит к отклонению обработанной детали от желаемой геометрии.

Операции механической обработки резанием, предшествующие закалке, снимают черновой припуск и оставляют межоперационный припуск определенной величины. На производстве, обычно, межоперационный припуск соответствует таким размерам заготовки, при которых становится возможной закалка на полную глубину материала. Технолог, назначая межоперационный припуск, руководствуется желанием оставить как можно больше материала,

чтобы иметь возможность вписать деталь в заготовку, поменявшую свою форму в виду наличия остаточных закалочных напряжений. Таким образом, снижение уровня коробления и остаточных закалочных напряжений является важной задачей для повышения точности производства крупногабаритных каркасных деталей ЛА, так как непосредственно влияет на их качество и стоимость.

Степень разработанности. Первым метод выбора припуска наиболее подробно описал профессор Кован В.М. Как отмечает сам автор, методы определения припусков направлены, прежде всего, на экономию материала, и рассматриваются детали достаточно высокой жесткости. Наиболее подробное описание правки и изогнутости приводится для валов. Описание деталей сложной геометрической формы и, тем более, из алюминиевых сплавов, представлены слабо или полностью отсутствуют. Подобно описанию Кован В.М., определение величины припуска приводит коллектив авторов под общей редакцией Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К., расширяя метод на детали, получаемые электроэрозионной обработкой и литьем. 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. Авторы Харламов Г.А. и Тарапанов А.С. в общем случае разделяют метод определения припуска на: расчетно-аналитический метод и опытно-статистический.

За последние двадцать лет появился ряд работ посвященных прогнозированию остаточных деформаций при производстве маложестких деталей летательных аппаратов. Так диссертационные работы Лившица А.В. «Прогнозирование локальных остаточных деформаций при проектировании технологического процесса изготовления маложестких деталей» и Александрова А.А. «Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей» посвящены вопросам технологической наследственности, влияющей на точность изготовления деталей типа панель, а также вопросам влияния закалки листовых заготовок на последующие этапы производства. В таком же ключе рассматриваются вопросы технологической наследственности автором Ботвенко С.И., выпустившим ряд статей, а также книгу «Технологические остаточные напряжения и деформации». Наибольший интерес из современных работ представляют работы Каргопольцева С.К., выпустившего ряд статей и написавшего диссертацию на тему «Управление деформированным состоянием маложестких деталей типа пластин с подкреплением на основе его прогнозирования при проектировании

технологического процесса». Данный автор среди прочего рассматривает вопрос пространственного размещения детали в заготовке с варьированием формы заготовки. Все вышеперечисленные авторы хотя и упоминают о наличии припуска под термическую обработку, однако не акцентируются на нем и не представляют методик по его расчету.

Целью диссертационной работы является исследование влияния величины межоперационного припуска под закалку на уровень коробления крупногабаритных заготовок и точность деталей производимых из них.

Задачи исследования:

- исследовать факторы, влияющие на возникновение коробления при закалке.
- исследовать влияние процессов термической обработки на последующие операции механической обработки резанием при изготовлении крупногабаритных каркасных деталей летательных аппаратов.
- определить технологические рекомендации по снижению поводов после закалки и снижению коробления закаленных деталей после операций механической обработки.

Научная новизна:

1 Разработан критерий сопротивляемости заготовки короблению при закалке (Pv), отражающий способность заготовок каркасных деталей летательных аппаратов противостоять возникновению коробления при закалке в зависимости от назначенного припуска.

2 Разработана методика выбора величины припуска на каркасные детали летательных аппаратов под термическую обработку, основанная на критерии сопротивляемости заготовки короблению при закалке (Pv).

3 Определено влияние величины припуска под термическую обработку на точность изготовления геометрически сложных деталей летательных аппаратов проходящих этап закалки между операциями механической обработки.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке методики определения величины межоперационного припуска под закалку для каркасных крупногабаритных авиационных деталей с учетом склонности их заготовки к короблению. Разработка показателя склонности к короблению заготовок крупногабаритных каркасных деталей в зависимости от величины припуска и направления погружения заготовки детали в закалочную среду.

Практическая значимость работы.

1 Составлены рекомендации по выбору припуска под закалку для крупногабаритных каркасных деталей летательных аппаратов, подвергаемых в дальнейшем механической обработке.

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

3 Разработана процедура для конечно-элементного пакета ANSYS, позволяющая моделировать процесс погружения детали в закалочную среду.

Методология и методы исследования. Использовались теоретические и экспериментальные методы по исследованию процессов коробления при термической обработке.

Теоретическое исследование выполнялось с помощью математического моделирования закалочных напряжений и деформаций. Поведение материала каркасных деталей ЛА при закалке описывалось моделью течения материала с билинейным изотропным упрочнением для которого справедливы уравнения Прандтля – Рейсса и условия пластичности Губера – Мизеса. Использовались программные продукты: математический пакет Mathcad, конечно-элементный пакет ANSYS Academic Research Mechanical and CFD (далее ANSYS).

Экспериментальные исследования по закалке каркасных деталей ЛА проводились в лабораторной электрической печи камерного типа СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ и в печи для крупногабаритных деталей расположенной на территории филиала ПАО «Компания «Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова» в г. Новосибирске. Измерения закалочных поволодок выполнялись на машине трехкоординатной измерительной ACCURA™ фирмы "Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH" и на микроскопе измерительном Nikon MM-400.

Положения, выносимые на защиту:

1 Критерий сопротивляемости заготовки короблению при закалке (P_v).

2 Методика расчета величины припуска на каркасные крупногабаритные детали под закалку, исходя из критерия сопротивляемости заготовок короблению (P_v).

3 Повышение точности изготовления каркасных деталей летательных аппаратов, проходящих закалку между операциями механической обработки, путем определения припуска под закалку согласно предлагаемой методике.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных принципов теории термодинамики, сравнением результатов математического моделирования с результатами экспериментов, проведенных с использованием средств измерения имеющих свидетельства о поверке, а так же с использованием аттестованного промышленного оборудования.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных 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 2011 г.);
- XII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос (г. Новосибирск, 20-22 апреля 2011 г.);
- XIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 200-летию Бородинской битвы (г. Новосибирск, 18-20 апреля 2012 г.);
- Он-лайн совещания ОАО «ОАК» с опорными ВУЗами по перспективным НИОКР в области авиационной промышленности (Москва-Новосибирск, 3 октября 2013 г.);
- VII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2013 г.);
- XII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2019 г.);
- II International Scientific Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering - MIST: Aerospace - 2019 in November 18-21, 2019 in Krasnoyarsk, Russia.

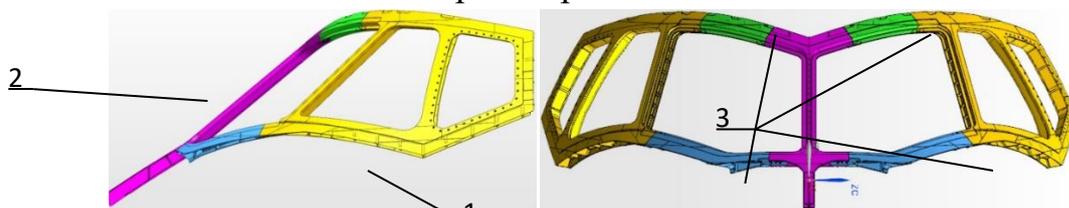
Личный вклад соискателя. Автор, совместно с научным руководителем, участвовал в постановке задач исследования, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, написании статей по теме исследования и проведении экспериментальных работ. Автор лично участвовал в постановке и решении задачи математического моделирования процесса закалки, в проведении работ на производственной базе филиала ПАО «Компания «Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова» по внедрению разработанной методики расчета межоперационного припуска и принимал участие в изменении и разработке новых технологических процессов вызванных внедрением разработанной методики с целью повышения точности изготовления деталей ЛА.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения в совокупности изложенных на 95-ти страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка, 3 таблицы и одно приложение. Список литературы включает 93 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность и степень разработки темы исследования, определены цели и основные задачи работы, отражена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе диссертации дан обзор причин повышения сложности конструкции деталей переплета фонаря современных авиалайнеров, связанных с повышением аэродинамического и весового совершенства. Приведено сравнение фонарей самолётов, спроектированных до 1990-го года и после 2000-го. Рассмотрены технологические последствия перехода от плоского остекления к остеклению одинарной кривизны.



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

Рисунок 1 – Переплёт фонаря SSJ-100.

Рассматривается конструкция рамы переплета фонаря самолетов семейства SSJ (рисунок 1), а также проблемы связанные с её производством, заключающиеся в необходимости обеспечения достаточной точности отдельных деталей. В качестве основной проблемы рассмотрена технологическая наследственность. А именно остаточные напряжения и коробление заготовки, возникшие в ходе закалки, которые приводят к значительному отклонению геометрии готовой детали от требуемой.

Произведен анализ предшествующих исследований Биргера И.А., Райцеса В.Б., Чернышева Г.Н., Трыкова Ю.П., который показал, что возникновение остаточных напряжений, характер их распределения и величина зависят, прежде всего, от нагрузок их породивших. Авторы описывают остаточные напряжения, возникающие в результате резкого охлаждения сильно нагретых деталей, что характерно для закалки. Такие авторы как Лившиц А.В. и Александров А.А. рассматривают влияние термических остаточных напряжений на производство мало жестких деталей. В том же ключе вопросы технологической наследственности рассматривает Ботвенко С.И. Каргопольцев С.К. рассматривает детали типа пластин с подкреплением и вопросы, связанные с управлением деформированным состоянием, а также варьированием формы заготовки. Автор отмечает, что наиболее благоприятным является тот случай, когда главные оси инерции сечения детали совпадают с главными осями инерции заготовки.

В качестве одного из факторов, влияющего на технологическую наследственность, в работе выбрана величина припуска под закалку. Радкевич Я.М., Харламов Г.А., Тарапанов А.С., Кован В.М., Белов М.А., Васин А.Н., Соколов С.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А. рассматривая вопрос выбора операционных припусков, руководствуются, прежде всего, глубиной дефектного слоя, возникшего после термообработки. Величину минимального промежуточного припуска предлагают рассчитывать исходя из следующих уравнений:

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

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

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

где z_{i_min} – припуск на сторону при последовательной обработке противоположных или отдельно расположенных плоскостей; $2z_{i_min}$ – припуск на две стороны при параллельной обработке противоположных плоскостей; $2z_{i_min}$ – припуск на диаметр при обработке наружных или внутренних поверхностей вращения; $Rmax_{i-1}$ – 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; ε_i – погрешность установки заготовки при выполняемом переходе.

Подобные оценки величины припуска для назначения под закалку оказываются заниженными и на производстве не используются. Широко в литературе представлены методики определения величины припуска для деталей простой формы и не претерпевающие значительное коробление вследствие перераспределения напряжений из-за удаления части материала в ходе обработки. Не встречается определение припуска с учетом остаточных напряжений и деформаций, то есть не определяется величина припуска, которая могла бы исключить или снизить уровень коробления готовых деталей после механической обработки. На основе проведенного обзора были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются общие вопросы и подходы к моделированию методом конечных элементов (МКЭ) задач термоупругопластичности. Рассматриваются вопросы точности решения нестационарной тепловой задачи. Показано сравнение известного аналитического решения охлаждения бесконечного цилиндра с граничными условиями третьего рода на поверхности с моделированием. Моделирование

проводилось в нескольких вариациях, в которых изменялись как шаг по времени, так и размер сетки. Рассматривается вопрос, связанный с выбором размера конечных элементов в зависимости от шага по времени

Процесс закалки характеризуется постепенным погружением в закалочную среду. Процесс погружения влияет на температурное поле закаливаемых деталей. А значит и на деформированное состояние. Поэтому проводилось исследование влияния процесса погружения в закалочную среду. С целью реализации процесса погружения тела в закалочную среду при моделировании в ПО Ansys автором был реализован макрос на языке APDL. Макрос представляет собой 4-х мерную таблицу записанную при помощи команды:

DIM,ТЕРЛООВМЕН,tab4,TS,TZ,7,,TIME,Y,TEMP

где DIM – параметр APDL, ТЕРЛООВМЕН – название таблицы, tab4 – размерность таблицы (соответствует 4-х мерной таблице), TIME – параметр APDL соответствующий времени, определяет зависимость аргумента от параметра TS, задает необходимое количество шагов по времени, в ходе которых происходит погружение, TZ – количество шагов погружения, 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. Для демонстрации разработанного макроса, в работе приводятся результаты моделирования тепловой задачи с погружением для цилиндра длиной 250 мм и диаметром 50 мм, на котором наглядно показана неравномерность температурного поля, возникающая в процессе погружения.

Моделирование закалки помимо моделирования тепловой задачи содержит решение задачи упругопластичности. Упругопластические процессы, происходящие при закалке, в общем случае характеризуются обобщенной математической моделью, для которой деформация определяется как:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^B + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{ph} + \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^c \quad (4)$$

где ε_{ij} – тензор полной деформации; ε_{ij}^e – тензор упругой деформации; ε_{ij}^p – тензор пластической деформации; ε_{ij}^{th} – тензор тепловой деформации; ε_{ij}^{ph} – тензор деформации фазового превращения; ε_{ij}^c – тензор деформации ползучести. Ввиду кратковременности процесса закалки ползучесть не вносит существенного вклада в величину полной деформации, а алюминиевый сплав АК6, детали из которого рассматриваются в работе, не претерпевает полиморфного превращения при закалке, поэтому учет этих двух членов можно не производить.

При моделировании закалки в работе использовалась теория течения для материала с билинейным изотропным упрочнением, для которого справедливы

уравнения Прандтля-Рейсса и условия пластичности Губера-Мизеса. Характеристики материала при различных температурах, в том числе и теплофизические, были предоставлены центральной заводской лабораторией Новосибирского авиационного завода им. В.П. Чкалова, на базе которого проводились экспериментальные исследования и внедрение результатов работы.

В работе приводится сравнение результатов моделирования и экспериментов по закалке бруса размерами 41x18x200 мм (см. рисунок 2) выполненного из сплава АК6. Температура нагрева под закалку 515 °С, температура закалочной среды 25 °С. Рассматривались 2 различных варианта погружения бруса в закалочную среду: 1) вдоль стороны $A=18$ мм (далее моделирование/эксперимент №1) 2) вдоль стороны $H=41$ мм (далее моделирование/эксперимент №2).

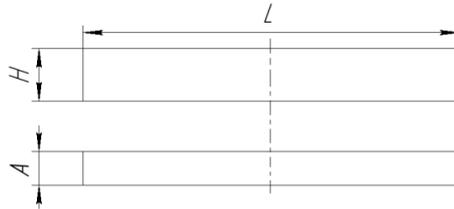


Рисунок 2 – Эскиз закаливаемого бруса

На грань образца, вдоль которой осуществлялось погружение, наносилась делительная сетка. Оценка уровня коробления производилась посредством сравнения координат точек пересечения линий сетки до и после закалки. После проведения закалки повторное измерение координат точек производилось в течение первых шести часов. С целью исключения влияния эффекта естественного старения и эффектов ползучести на результаты эксперимента.

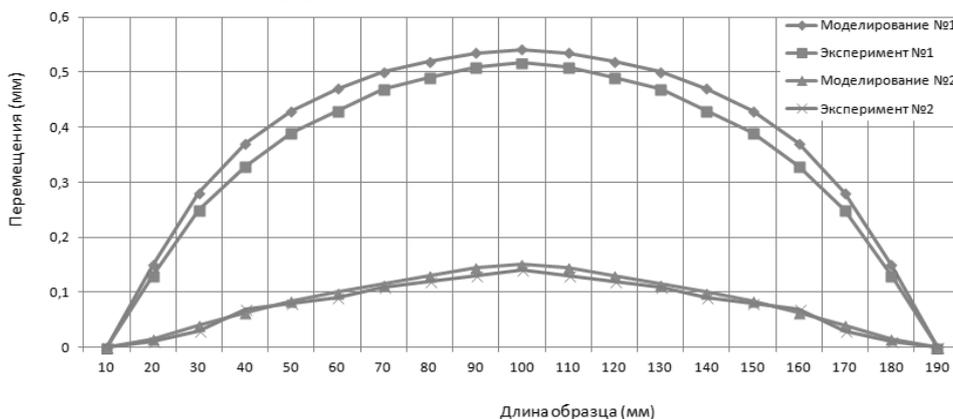


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Качественно моделирование и эксперимент полностью совпадают. Количественно результаты отличаются (рисунок 3), погрешность варьируется

от 4 до 23%, в зависимости от расположения точки по длине L образца (рисунок 4).

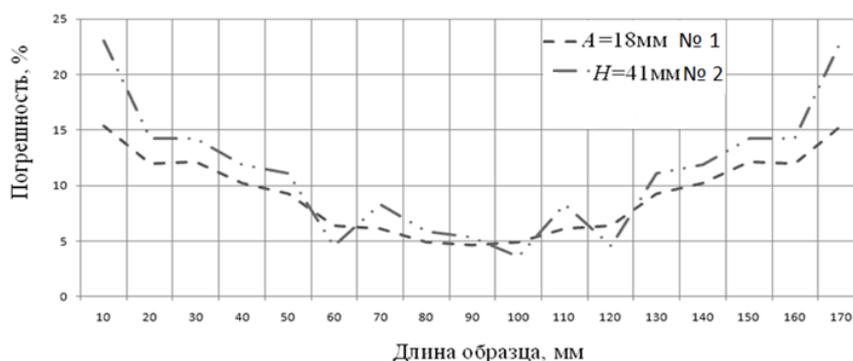
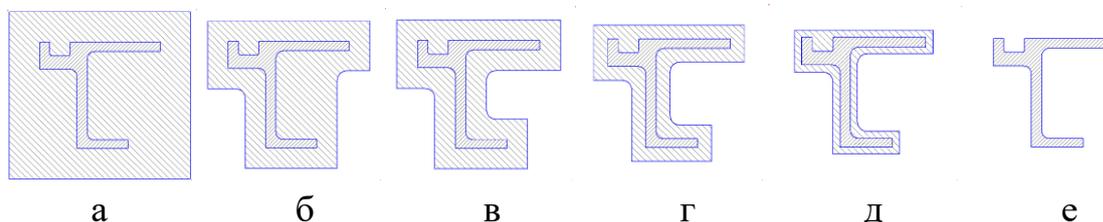


Рисунок 4 – Относительная погрешность данных расчета к данным полученным экспериментально

Анализ полученных данных, как экспериментальных, так и результатов моделирования, позволил сделать вывод не только о значительном влиянии процесса погружения образца на коробление, но и о влиянии ориентации самого образца относительно направления погружения. Сечение бруса имеет два главных момента инерции. При погружении по направлению перпендикулярном главной оси инерции, относительно которой сечение имеет максимальный главный момент, приводит к меньшему уровню коробления. Таким образом, располагая заготовку в закалочной корзине различными способами, можно получить различный уровень коробления.

Крупногабаритные каркасные детали ЛА имеют сложную геометрическую форму. Они могут иметь элементы, выходящие на теоретический контур и повторяющие его форму, а сечения различных элементов каркаса значительно отличаются даже в рамках одной детали. В работе приводятся данные по моделированию закалки на примере сечения каркасной детали с различным припуском.

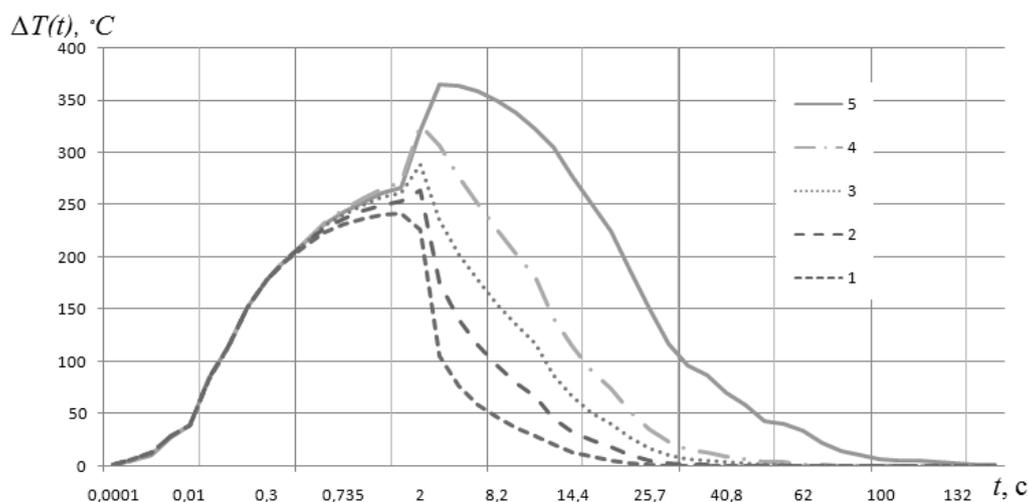


- а) заготовка прямоугольной формы с неравномерным припуском; б) припуск 12 мм с напуском; в) равномерный припуск 12 мм; г) равномерный припуск 8 мм; д) равномерный припуск 4 мм; е) сечение детали без припуска

Рисунок 5 – Общий вид сечения заготовок и детали.

На рисунке 5 представлены сечения заготовки с размещенным сечением детали внутри. Моделирование процесса закалки сечений производилось

исходя из выше изложенных принципов. В качестве материала заготовок так же принимался сплав АК6.

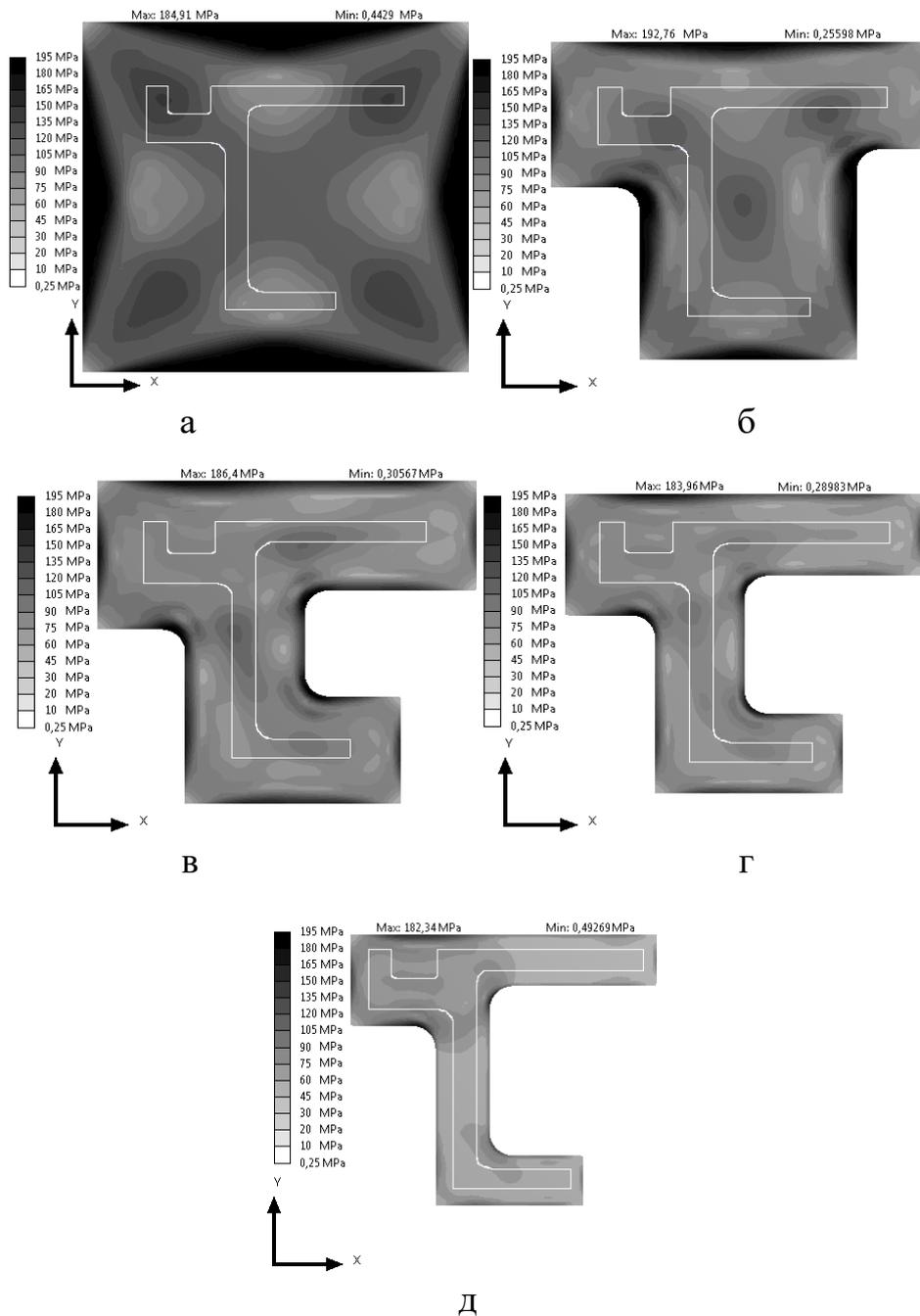


1) сечение с равномерным припуском 4 мм; 2) сечение с равномерным припуском 8 мм; 3) сечение с равномерным припуском 12 мм; 4) сечение с неравномерным припуском от 8 мм до 18 мм; 5) сечение прямоугольной формы с неравномерным припуском

Рисунок 6 – График разницы максимальной и минимальной температуры в сечении в зависимости от времени охлаждения

На рисунке 6 представлен график разницы максимальной и минимальной температуры в сечении заготовки наблюдаемой в процессе охлаждения в один и тот же момент времени. Если в начале процесса охлаждения практически для всех вариантов припуска максимальная наблюдаемая разность температур одинакова, то с ходом дальнейшего процесса охлаждения эта разность растет. Хорошо заметно, что сечение с минимальным припуском имеет минимальное значение ΔT . Благодаря меньшей величине припуска внутренние области охлаждаются быстрее и, как следствие, имеют меньшую разницу температур с внешними слоями.

Известно, что остаточные закалочные напряжения связаны с неравномерностью теплового поля, возникающей в ходе охлаждения. Результаты моделирования, представленные на рисунке 7, наглядно демонстрируют разницу в распределении остаточных напряжений по сечению заготовки в зависимости от величины припуска, а значит и от максимальной разницы температур по телу в один момент времени. Исходя из результатов моделирования, снижение величины припуска кажется логичным для снижения общего уровня остаточных напряжений.



а) равномерный припуск 4 мм; б) равномерный припуск 8 мм; в) равномерный припуск 12 мм; г) неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д) заготовка прямоугольной формы с неравномерным припуском
Рисунок 7 – Общий вид сечения детали с припуском

Видно (рисунок 7), что максимальные значения эквивалентных напряжений для каждого варианта практически одинаковы. Но площадь, занимаемая эквивалентными напряжениями от 100 до 180 МПа, значительно различается, а напряжения свыше располагаются преимущественно по контуру сечения и характеризуют дефектный закалочный слой. Снижение величины припуска благотворно влияет на характер распределения напряжений, но снижает жесткостные характеристики сечения. Увеличение припуска положительно

сказывается на увеличении жесткости, но приводит к тому, что значительные напряжения проникают вглубь сечения и начинают занимать площадь детали (рисунок 7, деталь показана белым контуром).

Не столько величина напряжений влияет на искажение формы готовой детали, сколько прохождение границ детали, через места значительного изменения уровня напряжений или даже их «знака».

Характер распределения остаточных напряжений оказывает влияние влияния на геометрическую форму готовой детали, освобожденной от припуска. Это выражается в том, что при поэтапном удалении припуска при механической обработке, напряжения перераспределяются и заготовка переходит в новое равновесное состояние, которое характеризуется новой деформированной формой. И чем больший слой материала (большая глубина резания) удаляется за одну операцию резания, тем большие коробления будут возникать. На производстве это приводит к необходимости снижения величины удаляемого припуска за одну операцию и увеличению количества фрезерных операций. То есть деталь обрабатывается с удалением малого слоя материала, после чего осуществляется её переворот и удаление малого количества материала с противоположной стороны. Этот прием технологов, хоть и позволяет поэтапно перераспределять остаточные напряжения, однако чрезвычайно трудоемок и ведет к значительному увеличению времени изготовления детали, не гарантируя нужного результата. Необходимо соблюдать баланс между чрезмерным припуском, который создаст внутри детали значительные зоны с высокими напряжениями и минимальным припуском который чрезмерно снизит жесткость заготовки.

Исходя из описанных соображений, автором предлагается критерий сопротивляемости заготовки короблению при закалке:

$$Pv = \frac{J_x}{S \cdot \Delta t_{max}} \quad (5)$$

где J_x – центральный момент инерции относительно оси перпендикулярной оси погружения, S – площадь сечения заготовки, Δt_{max} – максимальная разница температур, наблюдаемая при охлаждении заготовки с данным припуском.

Отношение геометрического момента инерции к площади сечения неразрывно связано с гибкостью и, по сути, является квадратом радиуса инерции. Данное отношение показывает влияние величины припуска на жесткость заготовки. Максимально наблюдаемая разница температур в один момент времени, которая непременно увеличивается с ростом величины припуска, отвечает за возникновение термических напряжений.

Автором предлагается методика выбора величины межоперационного припуска под закалку на каркасные детали летательных аппаратов, основанная

на сравнительном анализе значений критерия Pv полученных в зависимости от величины припуска.

Методику определения припуска можно описать следующим алгоритмом:

1. **Выбор типовых сечений детали:** необходимо произвести выбор характерных сечений, имеющие различные форму, толщины полок и стенок, и т.д.

2. **Построение сечений с различным припуском:** необходимо построить сечения с различным припуском. Целесообразным представляется рассматривать припуск до 200%, с шагом 50% начиная от минимального припуска, рассчитанного по методике, разработанной профессором Кованом В.М. Данные значения не являются жесткими требованиями, а лишь разграничивают возможное поле применяемых припусков.

3. **Определение максимального перепада температур Δt_{max} :** необходимо для каждого сечения определить максимальный перепада температуры возникаемый в ходе охлаждения при закалке.

4. **Определение максимального значения Pv_{max} :** исходя из полученных данных о максимальном перепада температуры, при охлаждении в ходе закалки, площади сечения, и его моменте инерции (таблица 1) необходимо построить график Pv в зависимости от величины припуска (рисунок 8).

Таблица 1 – Расчетные данные критерия Pv

Величина припуска Z , мм	Геометрический момент инерции сечения J , m^4	Площадь сечения S , m^2	Pv , $m^2/^\circ C$
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}

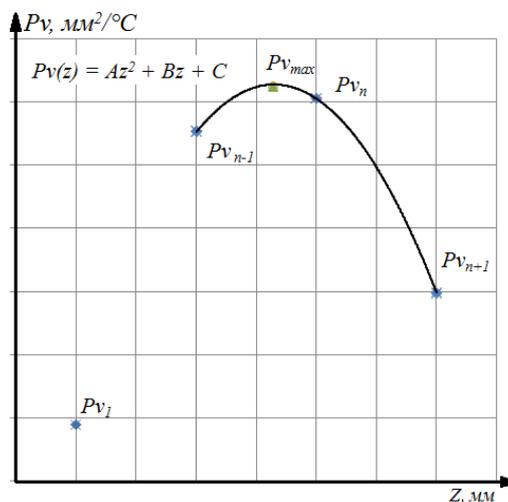


Рисунок 8 – График зависимости показателя Pv от величины припуска

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 $[z_{n-1}; z_{n+1}]$.

5. Определение припуска на деталь: после того как был определен припуск для каждого характерного сечения детали, необходимо определить припуск для детали в целом. Для этого необходимо выбрать либо максимальный припуск из определенных в п.4, при условии, что для прочих характерных сечений не приведет к значительному снижению показателя Pv . 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 на её различных элементах. Не стоит снижать значение критерия Pv , путем выбора соответствующей величины припуска, для элементов детали, расположенных таким образом, что минимальный главный момент инерции сечения элемента является перпендикулярным направлению погружения. При возможности стоит разместить заготовку таким образом, чтобы элементы ее геометрии с низкими жесткостными показателями располагались вдоль направления погружения.

В третьей главе рассматриваются проблемы, связанные с производством рамы переплета фонаря, и результаты внедрения разработанной автором методики определения величины припуска исходя из критерия сопротивляемости заготовки короблению при закалке (Pv). До проведения работ по выбору межоперационного припуска форма сечения заготовки соответствовала прямоугольнику со сторонами 100 мм и 120 мм.

Для оценки величины коробления заготовки после закалки производилось нанесение контрольных точек на её поверхности для измерения их координат до и после закалки. Измерения после закалки проводились в течение 2-х часов после охлаждения детали. Максимальное отклонение составило 4,68 мм.

Далее заготовка подвергалась искусственному старению и механической обработке. Полученные детали по такой технологии имели следующие типичные отклонения геометрии: отклонения от теоретического контура до 0,8 мм (при допустимых $\pm 0,5$ мм); отклонения толщин стенок $\pm 0,3$ (при допустимых $+0,2/-0,3$ мм). Такие детали дополнительно проходили этап рихтовки, если это было возможно, либо запускался процесс согласования с конструкторским бюро полученных отклонений. Все это удорожало и затягивало производство.

Для апробации разработанного показателя в раме переплета фонаря выделили 5 характерных сечений (рисунок 10). На каждое сечение было

назначено 5 вариантов припуска. Выбранный припуск накладывался по эквидистанте и его величины составили 9, 7, 5 и 3 мм соответственно.

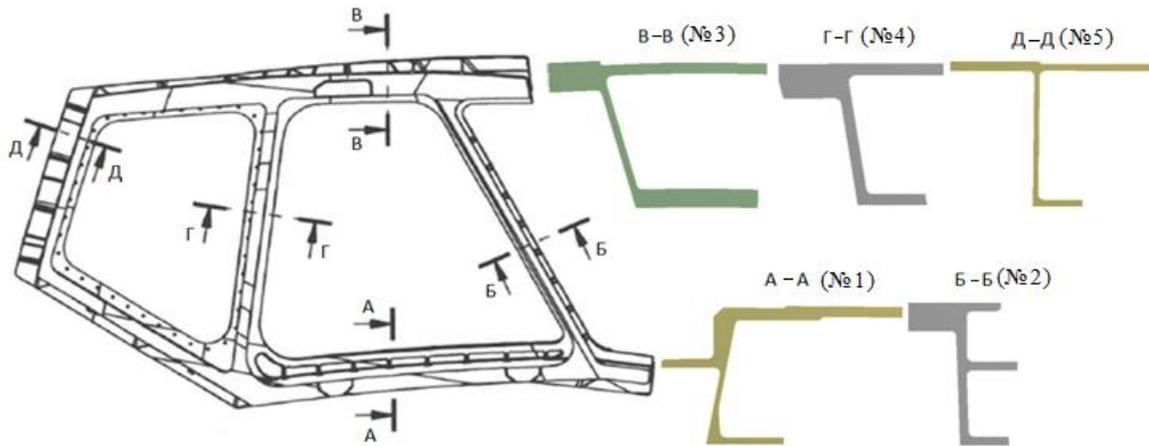


Рисунок 10 – Эскиз рамы переплета фонаря и характерных сечений

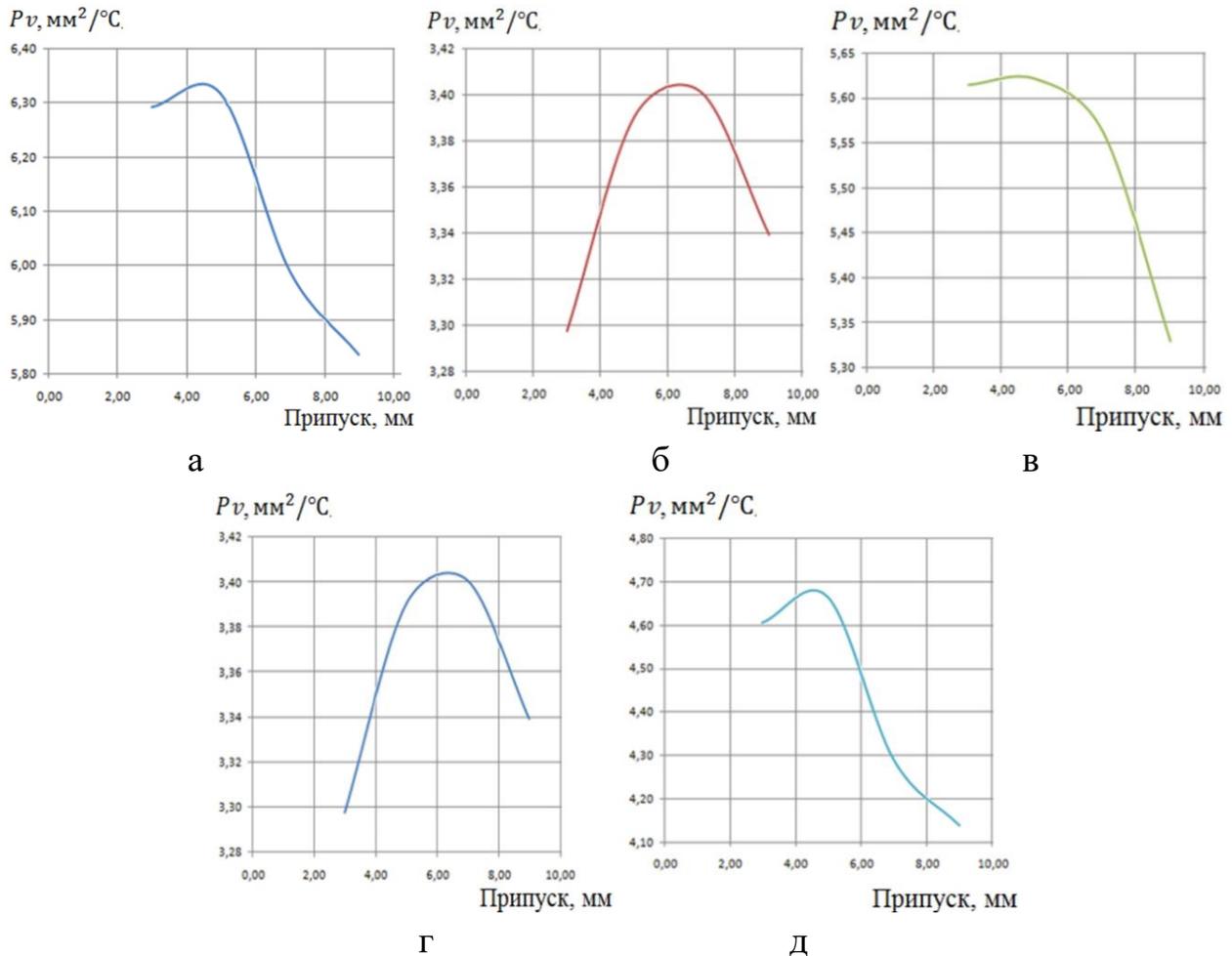


Рисунок 11 – Значение Pv в зависимости от величины припуска для различных сечений

Для каждого сечения заготовки (с различным припуском) были проведены как расчеты показателя Pv , так и расчет процесса закалки. Изменение Pv в зависимости от величины припуска показано на рисунке 11. Результаты для

прямоугольного сечения заготовки размерами 100x120 мм, используемого ранее на производстве, составляют $P_{v_y}=3,26 \text{ мм}^2/^\circ\text{C}$, $P_{v_x}=2,27 \text{ мм}^2/^\circ\text{C}$ (P_{v_y} –погружение вдоль 120 мм, P_{v_x} –погружение вдоль 100 мм).

Как можно видеть, ни один из вариантов с равномерным припуском не демонстрирует значение P_v меньше, чем у заготовки с прямоугольным сечением. Проанализировав полученные графики, можно заметить, что они обладают явным максимумом значения P_v , соответствующего припуску от 4,5 мм до 6,5 мм. Так как показатель призван дать отправную точку для назначения припуска, то с учетом ранее полученного опыта при производстве данной детали в рамках описываемой работы величина припуска под термическую обработку была выбрана в размере 6 мм для всей детали (рисунок 12).



Рисунок 12– Общий вид заготовки рамы переплета фонаря с равномерным припуском 6 мм

После определения величины припуска была построена 3D модель заготовки под закалку. Дополнительно на их поверхности формировались цилиндрические выступы, необходимые для измерения коробления, возникающего в результате закалки (рисунок 12). В ходе измерений определялись координаты центра окружности цилиндрического выступа до и после закалки.

Как и ранее, заготовка в течении 2-х часов после полного остывания повторно контролировалась с целью измерения уровня коробления. Измерению подвергалась вся партия в количестве 12-ти деталей. В дальнейшем, на протяжении 3-х партий измерялись только по две заготовки с целью подтверждения стабильности полученного результата.

Типичная картина отклонения контрольных точек от исходного (до закалки) состояния продемонстрирована на рисунке 13. Максимальное коробление составило 2,04 мм, что более чем в 2 раза, меньше коробления наблюдаемого до изменения технологии. Далее заготовки проходили этап искусственного старения и дальнейшую механическую обработку.

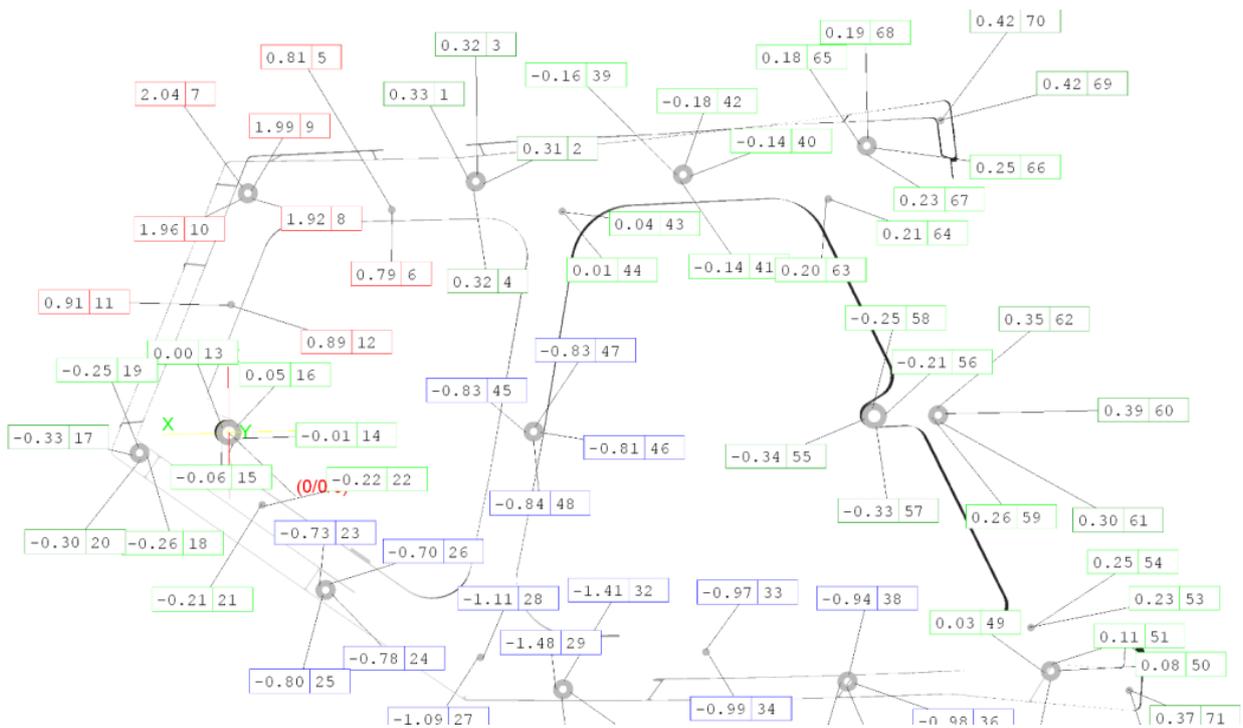


Рисунок 13 – Результаты измерения коробления новой заготовки с равномерным припуском

После проведения финишных механических операций, каждая готовая деталь подвергается контролю геометрии. Предельно допустимые отклонения на аэродинамические обводы составляют $\pm 0,5$ мм, предельные отклонения толщин $+0,2/-0,3$ мм. Для детали, изготовленной с новым припуском под закалку отклонения от 3D модели, составили: $+0,11/-0,24$ мм для аэродинамических обводов, и $+0,1/-0,1$ мм для толщин стенок, что полностью удовлетворяет требованиям конструкторской документации. Контрольная операция по измерению отклонений геометрии рамы и заготовок от электронной модели проводилась на контрольно-измерительной машине AcuraZeiss.

Проведенные изменения технологического процесса позволили производить раму переплета фонаря с должной точностью, отказаться от дополнительных механических операций по постепенному удалению припуска (для обеспечения не занижения стенок) и операций рихтовки. Это позволило снизить затраты и время производства рамы переплета фонаря, исключая брак при производстве.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Подтверждена взаимосвязь коробления заготовки при закалке с направлением погружения. Определены предпочтительные направления погружения для крупногабаритных авиационных деталей сложной геометрии, –

вдоль элементов, сечение которых имеет наименьшую жесткость, и поперек элементов, имеющих наибольшую жесткость.

2 Установлена взаимосвязь величины припуска с характером распределения остаточных напряжений и уровнем коробления заготовки, на основании которой разработан критерий сопротивляемости заготовки короблению при закалке (Pv).

3 Разработана методика определения величины межоперационного припуска под закалку для крупногабаритных каркасных деталей, исходя из критерия сопротивляемости заготовки короблению.

4 Разработан новый технологический процесс, позволяющий исключить операции рихтовки и дополнительной механической обработки рамы переплета фонаря, обеспечивающий производство детали согласно требованиям конструкторской документации.

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

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 4,7 до 2,04 мм. Отклонения теоретического контура готовой детали снизились с 0,8 мм до 0,14 мм (при допустимых $\pm 0,5$ 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).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

1 **Бачурин, А. С.** Влияние величины припуска на остаточные закалочные напряжения деталей самолета [Текст] / 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. (Перечень ВАК)

2 **Бачурин, А. С.** Численное моделирование процесса закалки алюминиевых деталей [Текст] / 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. (Перечень ВАК)

3 **Бачурин, А. С.** Влияние закалки на остаточные деформации деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов [Текст] / А.С. Бачурин, К.Н.

Бобин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 3. – С. 119-123. (Перечень ВАК)

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

5 **Бачурин, А. С.** Математическая модель процесса закалки деталей [Текст] / А.С. Бачурин, И.А. Осипов, А.Б. Гулидов, К.Н. Бобин, Н.А. Рынгач, Н.В. Курлаев // Авиационная промышленность. – 2014. – № 3. – С. 43. (Перечень ВАК).

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

Публикации включённые в базу цитирования Scopus.

7 **Bachurin, A. S.** On the choice of in-process allowance for hardening [Text]/ A. S. Bachurin, N. V. Kurlaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.– 2020. – Vol. Vol. 734: - Art. 012010. - DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/0120106. (Scopus)

Публикации в других изданиях.

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

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

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

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

12 **Гумбатова, С. А.** Рационализация технологического процесса изготовления переплета фонаря кабины самолёта SSJ-100 [Текст] / С.А.

Гумбатова, А.С. Бачурин, Н.В. Курлаев // VII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения». – Томск: ТПУ, 2013. – С. 281–282.

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

14 **Pavlushenko, N.** Relationship between quenching deformations and machining allowance [Text] / N. Pavlushenko, A. Bachurin, N. Ryngach // 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

15 **Бобин, К. Н.** Повышение точности изготовления деталей летательных аппаратов [Текст] / К.Н. Бобин, М.Б. Детинов, Н.В. Курлаев, А.С. Бачурин // «Научные вести». – 2019. – № 10 (15). – С. 77–85.

16 **Бачурин, А. С.** Моделирование припусков для автоматизированной механообработки деталей сложной формы [Текст] / А.С. Бачурин, Н.В. Курлаев // В сб.: Современные проблемы машиностроения. Труды XII Международной научно-технической конференции. Под редакцией А.Ю. Арляпова. – Томск: Издательство НИТПУ, 2019. - С. 136-140.

Подписано в печать 15.01.2021

Формат 60×84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф

Усл. печ. л. 1,4 Уч.-из. л. 1,06 Тираж 120 экз. Заказ 151.

Опорный вуз Новосибирский государственный технический университет
НГТУ НЭТИ,

Издательско-полиграфический комплекс, 1994-2020
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 2