

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

На правах рукописи

АЛЕКСАНДРОВ АНДРЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент А.В. Лившиц

Иркутск – 2016

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Современное состояние математического моделирования остаточных напряжений и деформаций.....	8
1.1 Определение остаточных напряжений и деформаций	8
1.2. Математическое моделирование остаточных деформаций маложестких деталей.....	13
1.3. Математическое моделирование остаточных напряжений маложестких деталей.....	29
2 Математическое моделирование процесса термической обработки заготовок.....	43
2.1 Постановка задачи моделирования остаточного напряженно-деформированного состояния.....	43
2.2. Математическое моделирование системы нестационарных температурных полей заготовок.....	46
2.3 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния термически обработанной заготовки	56
Выводы	61
Глава 3. Определение коэффициента теплоотдачи	63
3.1. Математическая модель процесса нагрева (охлаждения) при закалке и ее программная реализация	63
3.2. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи	75
Выводы	85
Глава 4. Апробация системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений	86
4.1 Экспериментальное определение диаграмм напряжений-деформаций	86
4.2 Расчет системы нестационарных тепловых полей и остаточных напряжений при производстве заготовок	89

4.3 Система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве мало жестких деталей.....	108
4.4 Разработка алгоритма уточненного расчета локальных остаточных деформаций с использованием системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений	112
4.5 Использование системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений для минимизации общих и локальных остаточных деформаций.....	115
Выводы.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	126
Приложение №1.....	141
Приложение №2.....	143
Приложение №3.....	157

ВВЕДЕНИЕ

Термические остаточные напряжения приводят к возникновению остаточных деформаций, браку и снижению качества деталей, получаемых из заготовок при механической обработке.

Для предотвращения коробления деталей необходимо знать уровень и распределение термических остаточных напряжений. На данный момент существует ряд методов, позволяющих определить величину и распределение термических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$. Широко представлены механические (разрушающие) и физические (неразрушающие) методы, не позволяющие анализировать процесс формирования напряжений и создавать научную основу необходимую для эффективного управления напряженно-деформированным состоянием изделия. При этом, отсутствуют расчетные методы определения термических остаточных напряжений и проблема определения их величины и локализации расчетными методами остается открытой.

Математическим моделированием процессов формирования остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и деформаций занимались В.В. Абрамов, И.А. Биргер, С.И. Ботвенко, Г. Бюлер, С.П. Гинкул, Н.Н. Давиденков, Ю.И. Замашиков, С.И. Иванов, С.К. Каргапольцев, С.И. Ключников, В.Е. Койре, А.В. Лившиц, А.И. Промптов и другие. Несмотря на значительное число проведенных исследовательских работ в данном направлении, есть вопросы, которые требуют своего решения.

Среди наиболее трудоемких задач необходимо отметить разработку системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений, использующую современные высокопроизводительные программные комплексы, реализующие численные методы. Важно отметить, что решение такой задачи в каждом конкретном случае связано с необходимостью трудоемкого определения специфических параметров процесса. В дополнение и развитие ранее предложенных работ, посвященных определению и управлению остаточным

напряженно-деформированным состоянием, была сформулирована цель и определены задачи исследования.

Целью работы является – разработка системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений на основе алгоритма идентификации температурозависимых параметров термической обработки при производстве маложестких деталей.

В соответствии с целью поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать систему компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей.

2. Разработать алгоритм идентификации температурозависимых параметров математической модели, характеризующих процесс нагрева (охлаждения) с высокой степенью универсальности.

3. Разработать математическую модель формирования нестационарных тепловых полей заготовки в процессе проведения термообработки, с учетом температурозависимых теплофизических свойств материала.

4. Провести исследование формирования термических остаточных напряжений и предложить пути их минимизации на основе использования разработанной системы компьютерного моделирования на примере закалки заготовок из алюминиевых сплавов.

Научную новизну работы составляют следующие результаты, выносимые на защиту:

1. Разработана новая система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений, представляющей собой совокупность программных комплексов: авторского программного комплекса (АС №2015617306), MSC Nastran, Marc, Sinda, связанных соответствием форматов входных и выходных данных, позволяющая рассчитывать термические остаточные напряжения с погрешностью не более 5%.

2. Впервые предложен алгоритм параметрической идентификации температурозависимых параметров, характеризующих процесс нагрева (охлаждения), позволяющий решать обратную задачу теплопроводности широкого перечня условий протекания процессов, отличающейся универсальным подходом к определению неизвестных параметров математических моделей процесса термообработки.

3. Сформирована математическая модель, представляющей собой уравнение Фурье-Кирхгофа с соответствующими начальными, граничными условиями, отличающаяся наличием экспериментальных зависимостей, характеризующих изменения температуры в процессе закалки в различных сечениях термообрабатываемой заготовки, позволяющая рассчитать коэффициент теплоотдачи и систему нестационарных тепловых полей, возникающих в процессе закалки.

Методы и методики:

Для решения поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования, включающие численные методы высшей математики, в том числе метод конечных элементов и конечных разностей. Для решения основных задач использовано компьютерное моделирование в программном комплексе MSC Nastran, Marc, Sinda. Для программной реализации был использован язык высокого уровня C++.

Достоверность проведенных исследований, выводов, рекомендаций, научных положений полученных в процессе выполнения диссертационной работы подтверждается согласованностью теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость результатов исследования состоит в том, что они вносят вклад в развитие математического моделирования термических остаточных напряжений. **Практическая значимость** работы. Создано программное обеспечение, реализующее разработанный алгоритм

параметрической идентификации и предложенную математическую модель, позволяющее моделировать процесс термической обработки и производить расчет коэффициента конвективной теплоотдачи. Разработан алгоритм минимизации остаточных напряжений, общих и локальных деформаций на основе методики прогнозирования термических остаточных напряжений. Разработан алгоритм корректировки условий термической обработки заготовок из алюминиевых сплавов, позволяющий снижать уровень остаточных напряжений без снижения механических свойств материала заготовки.

Результаты исследования **апробированы** на научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов электромеханического факультета Иркутского государственного университета путей сообщения (Иркутск, 2011), IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых факультетов «Транспортные системы» и «Системы обеспечения транспорта» «Проблемы транспорта Восточной Сибири» (Иркутск, 2013), IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (Иркутск, 2014), IV Всероссийской научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 2014), V международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2014). Основные теоретические положения диссертации нашли отражение в одиннадцати публикациях, в том числе в пяти изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен патент на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация производственных процессов» Иркутского государственного университета путей сообщения.

Глава 1. Современное состояние математического моделирования остаточных напряжений и деформаций

1.1 Определение остаточных напряжений и деформаций

К продукции современного машиностроения предъявляются высокие требования точности надежности долговечности, по этой причине проблема влияния остаточных напряжений на вышеперечисленные параметры получает особое значение. Остаточные (внутренние, собственные, предварительные, первоначальные) напряжения – это напряжения, присутствующие в детали без приложения внешних сил.

Остаточные напряжения классифицируются Давиденковым Н.Н. [48, 65] по протяженности силового поля на три группы:

- напряжения I рода – макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали;
- напряжения II рода – микронапряжения, распространяющиеся на отдельные зерна металла, или на их группу;
- напряжения III рода – субмикроскопические, относящиеся к искажению атомной решетки кристалла.

При оценке влияния остаточных напряжений на прочность и деформации необходимо учитывать макронапряжения напряжения I рода, которые возникают в деталях в большинстве технологических операций (при литье, ковке, термической и механической обработке) и по своей величине могут превосходить напряжения от внешних нагрузок. Например, в поверхностных слоях деталей машин после шлифования, остаточные напряжения иногда достигают 60-80 кГ/мм² [17]. Эти напряжения могут быть одной из главных причин техногенных аварий и разрушений надежных на первый взгляд конструкций в технике и в быту, и, тем не менее, ни один стандарт не устанавливает предельно допустимых значений для таких напряжений. Не существует и нормативных документов по учету остаточных напряжений при проектных прочностных расчетах конструкций

[136]. Остаточные напряжения могут играть положительную и отрицательную роль в эксплуатации изделий машиностроения. Так, например, хорошо известно, что сжимающие остаточные напряжения на поверхности изделий, получаемые при дробеструйной обработке, увеличивают прочность и коррозионную стойкость поверхностного слоя. Однако, чаще всего на практике, остаточные напряжения играют негативную роль. Остаточные напряжения, сформированные в процессе литья станин металлорежущих станков, вызывают остаточное коробление в течение длительного времени выдержки на складе, вследствие чего продолжительность технологических процессов производства высокоточных металлорежущих станков увеличивается, что неминуемо приводит и к увеличению себестоимости. Еще одним ярким примером негативного влияния остаточных напряжений является возникновение коробления в процессе производства маложестких деталей авиационного производства. Возникающие при механической обработке остаточные деформации являются основной причиной возникновения дефектов и увеличения брака, что приводит к увеличению себестоимости и снижению качества производимых деталей.

Учитывая вышесказанное, вопрос определения остаточных напряжений с целью предотвращения преждевременного разрушения конструкций, снижения коррозионной стойкости, надежности и долговечности, принимает особое значение. Поэтому для определения остаточных напряжений существует достаточное количество различных способов [72, 22, 105, 91, 91, 34, 36], которые условно можно разделить на две основные группы:

1. Разрушающие (механические)
2. Неразрушающие (физические)

Разрушающие способы определения остаточных напряжений объединяет один общий подход – удаление различных участков детали или заготовки, с целью нарушения уравновешенного напряженного состояния, формирования деформаций и измерения величины деформации для проведения расчетов

остаточных напряжений. К разрушающим способам определения уровня остаточных напряжений следует отнести стандартный метод тензометрического определения остаточных напряжений с использованием высверливаемого отверстия ASTM E837-08e1 [121]. Этот метод применяется для изотропных линейно-упругих материалов для определения однородных напряжений, примерно постоянных по глубине, по тонким образцам (толщина образца меньше диаметра высверливаемого отверстия) или для определения однородных и неоднородных напряжений, существенно изменяющихся по глубине, по толстым образцам (толщина образца больше диаметра высверливаемого отверстия). В процессе определения уровня остаточных напряжений, который должен превышать 50% от предела текучести материала σ_T , фиксируют локальные деформации, которые возникают за счет концентрации напряжений вокруг высверленного отверстия. Данный метод часто называют «полуразрушающим», так как исследуемый объект разрушается частично и рекомендован для применения, в тех случаях, когда полученные при определении отверстия не существенно влияют на последующую пригодность заготовки.

В работах [9, 8, 124, 25] представлены методы голографического контроля и лазерной интерферометрии. Эти методы являются схожими со стандартным методом определения остаточных напряжений σ проводимом при высверливании отверстий. Отличие заключается в том, что регистрация деформаций вокруг высверленных отверстий осуществляется при помощи отраженного спектра в виде голограммы.

В других способах определения остаточных напряжений производят разрезание заготовок на образцы в форме полосок, квадратов, треугольников и т.д. с дальнейшим проведением измерений деформации вырезанных образцов в разных направлениях.

Механические методы, наиболее изученные и проверенные, характеризуются высокой точностью (погрешность до 10%) и

производительностью, просты в применении, не требуют дорогостоящего оборудования. Основным недостатком этой группы методов – это необходимость разрушения исследуемого объекта разрезанием для определения остаточных напряжений, что приводит к недопустимости применения данного метода для изучения единичных и дорогостоящих объектов. Так же к недостаткам механических методов необходимо отнести изменение остаточных напряжений под действием упругих и пластических деформаций по механическому удалении слоя материала.

Учитывая недостатки механических методов, развитие получили неразрушающие методы определения остаточных напряжений. Одним из таких можно считать магнитоупругий метод [49, 13], который основан на изменении магнитной проницаемости μ и магнитной индукции B у ферромагнитных материалов в результате деформации кристаллической решетки под действием механических напряжений. Определение данным методом возможно только для ферромагнитных материалов и не применим, например, для алюминиевых сплавов, широко используемых в авиационной промышленности. Так же к неразрушающим методам необходимо отнести рентгеновский метод определения остаточных напряжений. Данный метод основан на явлении дифракции рентгеновских лучей при прохождении через кристаллическую решетку материала. К преимуществам данного метода необходимо отнести возможность определения остаточных напряжений для деталей, как простой, так и сложной формы, отсутствие необходимости разрушать образец при определении на малом расстоянии от поверхности заготовки. Основным недостатком данного метода является снижение точности определения остаточных напряжений на больших расстояниях от поверхности. Поэтому для определения остаточных напряжений рентгеновским дифрактометром на глубине необходимо удаление поверхностных слоев материала, что требует разрушения образца.

Существует метод определения остаточных напряжений при помощи

хрупких покрытий [68], который позволяет производить определение остаточных напряжений с погрешностью не более 25%. Суть метода заключается в нанесении на поверхность исследуемого тела специального тензочувствительного покрытия, в роли которого выступают канифольные лаковые и порошковые [89], оксидные [26] и стеклоэмалевые [10, 21] покрытия которые наносятся аэрозольным, газопламенным напылением, с последующей деформацией заготовки. Деформации исследуемого тела вызывают появление трещин хрупкого покрытия. В зависимости от длины, направления и расстояния между трещинами делается вывод о величине и распределении остаточных напряжений в исследуемой заготовке. В работе [33] представлен способ определения остаточных напряжений на поверхности материала в зависимости от изменения твердости. Идея метода заключается в сравнении твердости эталонного образца и твердости исследуемой заготовки. Данный метод позволяет без разрушения определить величину и знак напряжений исследуемой заготовки, однако данный метод имеет низкую точность, так как термически обработанные заготовки имеют неоднородность механических свойств поверхности, возникшую в процессе производства.

Еще один метод относится к группе неразрушающего контроля. Это метод АФЧХ (амплитудно-фазово-частотных характеристик) [76]. Метод основан на изменении электропроводности поверхностного слоя, которая зависит от напряженного состояния и других характеристик физико-химического состояния поверхности. Данный метод обладает значительной погрешностью измерений, так как электропроводность поверхностного слоя зависит от большого числа факторов и выделить влияние напряженного состояния на контролируемую характеристику, учитывая нелинейное изменение других характеристик, представляется сложной задачей.

Учитывая наличие широкого круга способов определения остаточных напряжений, их достоинств и недостатков, на производственных объединениях не производят определение остаточных напряжений, поэтому существует

необходимость в недорогом неразрушающем и точном методе определения остаточных напряжений, погрешность которого не будет превышать 10 %. Проведенный анализ текущей проблемы, на наш взгляд наиболее перспективным способом достижения этого результата является, построение математической модели формирования остаточных напряжений в процессе обработки, которая позволит рассчитывать возникающие остаточные напряжения, изучить процесс их формирования и предложить пути их минимизации.

1.2. Математическое моделирование остаточных деформаций маложестких деталей

Одной из наиболее актуальных задач, связанных с короблением и остаточными деформациями, по причине влияния остаточных напряжений, является производство маложестких авиационных деталей.

Авиационные маложесткие детали, характеризующиеся малой толщиной полотна и ребер, позволяют снизить вес, герметичность конструкции, себестоимость производства летательных аппаратов, так как позволяют:

- а) реализовать в одной детали элементы силового набора и обшивки;
- б) применить принцип блочной конструкции планера самолета, снижающей трудоемкость обработки и сборки его деталей;
- в) сократить количество конструктивных разъемов, а, следовательно, повысить герметичность изделия;
- г) уменьшить количество основных и крепежных деталей при обеспечении высокой прочности и снижении веса агрегатов;
- д) снизить себестоимость изготовления изделий в серийном производстве;
- е) повысить надежность и ресурс машин в эксплуатации [65].

В то же время, к маложестким деталям, имеющим сравнительно большие габариты, предъявляются высокие требования на неплоскостность, непрямолинейность (0,1-0,5 мм) и шероховатость (менее R_z40) [23, 91].

Процесс производства маложестких деталей можно представить в виде трех основных этапов.

Первый этап заключается в получении заготовок. В качестве заготовок для производства маложестких деталей простой формы выступают плиты и профили, полученные высокопроизводительными методами обработки давлением (штамповка, прокат, прессование) [6, 40, 71], которые обеспечивают минимальный вес заготовки за счет снижения припуска на механическую обработку благодаря максимальному сближению формы заготовки и будущей детали.

На втором этапе производится термическая обработка заготовок, чаще всего заключается в проведении закалки и искусственного старения. В процессе закалки происходит увеличение твердости и прочности заготовок путем получения в структуре сплавов перенасыщенных твердых растворов, а в процессе искусственного старения происходит увеличение вязкости и пластичности за счет частичного распада этих твердых растворов.

На третьем этапе производства заготовок происходит механическая обработка лезвийным инструментом, необходимая для получения требуемого качества поверхности, точности формы и размеров. Для повышения производительности и качества механическая обработка заготовок производится на фрезерных станках с числовым программным управлением.

Заготовки, используемые для производства крупногабаритных маложестких деталей самолетов, в основном производятся в виде листового проката и штампованного полуфабриката выполненные из деформируемых алюминиевых сплавов [6, 40, 70]. Основными сплавами для производства заготовок служат дуралюмины, сплавы системы алюминий-медь-магний, в которые дополнительно вводят марганец, для повышения коррозионной стойкости. Типичными представителями этой системы являются сплавы Д1, Д16, Д19. Так же в процессе производства используются высокопрочные сплавы системы алюминий-цинк-

магний-медь, типичными представителями которой являются сплавы В95 и В96, эти сплавы по сравнению с дуралюминами обладают большей чувствительностью к концентраторам напряжений и пониженной коррозионной стойкостью под напряжением. Сплавы обладают хорошей пластичностью в горячем состоянии и высокой прочностью по сравнению с дуралюминами после комплекса термической обработки. Третьей группой алюминиевых сплавов применяемых для производства заготовок является группа сплавов системы алюминий-медь-магний-железо-никель, которые обладают высокой жаропрочностью и работают при температуре до 300⁰С. Типичным сплавом представителем группы является сплав АК4-1.

По конструктивно-технологическим признакам все малогабаритные подкрепленные детали, с известным упрощением, можно разделить на две группы: с односторонним по отношению к полотну и двухсторонним оребрением. Оребрение в свою очередь, может быть как однонаправленным, так и двунаправленным (рис. 1, 2) [48].

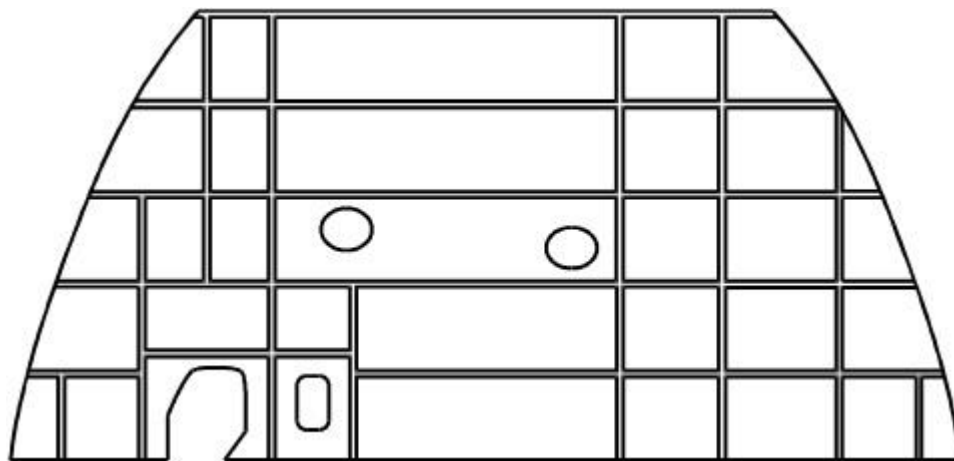


Рисунок 1 – "Панель"

При механической обработке заготовок, необходимой для получения малогабаритных деталей происходит удаление большого слоя припуска, который может составлять до 80 % от массы заготовки [16, 56, 92, 107, 114], это одно из основных отличий технологического процесса производства монолитных малогабаритных деталей и деталей другого типа.

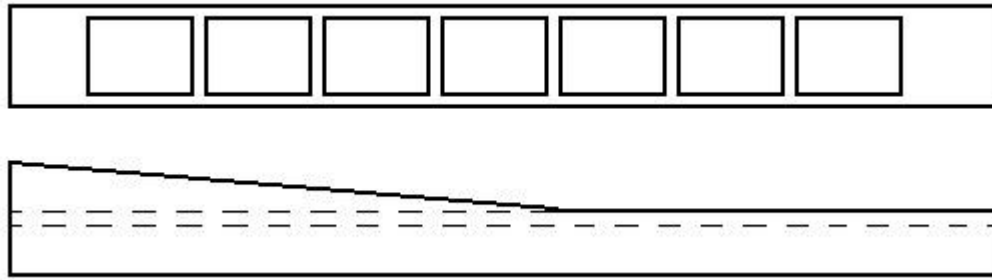


Рисунок 2 – "Лонжерон"

В процессе механической обработки заготовок и удаления большого припуска возникают проблемы, связанные с появлением общего коробления и локальной потери устойчивости полотна подкрепленных ячеек. Наиболее характерными видами деформаций при изготовлении мало жестких деталей различного типа являются [72]:

1. для деталей типа панелей больших габаритных размеров (рис. 1):
 - а. двухосный изгиб типа «парус» (рис. 3а);
 - б. одноосный гофрированный изгиб (рис. 3б);
 - с. локальная деформация полотна мало жестких деталей в межреберном пространстве (рис. 3в);
2. для деталей типа лонжеронов (рис. 2), больших размеров в одном направлении:
 - а. одноосный гофрированный изгиб (рис. 3б);
 - б. простой одноосный изгиб (рис. 3г);
 - с. локальная деформация полотна мало жестких деталей в межреберном пространстве (рис. 3в);

Возникновение деформаций в процессе механической обработки заготовок приводит к:

1. утончению, зарезам и другим дефектам полотна подкрепленных ячеек [65];
2. отклонению по точности форм и размеров деталей;

3. введению дополнительных операций правки и рихтовки;
4. снижению эксплуатационных свойств, таких как долговечность, выносливость и надежность;

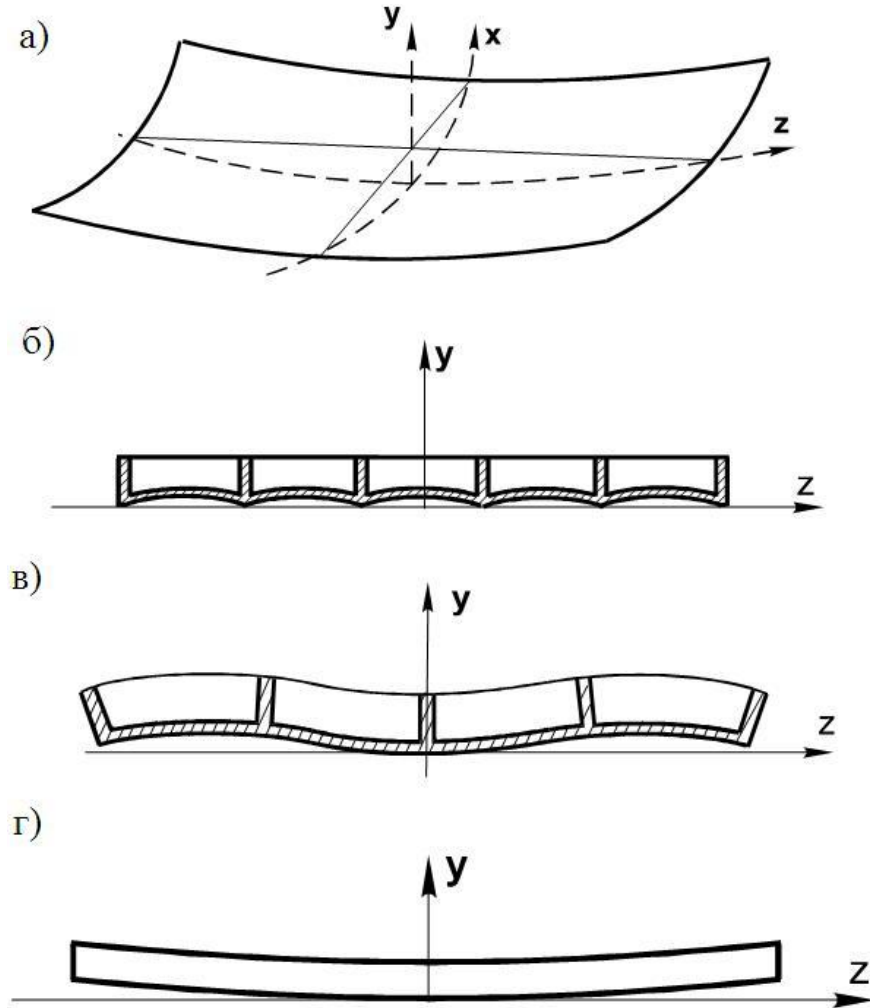


Рисунок 3 – Деформации, возникающие при механической обработке маложестких деталей

Изменение формы и размеров заготовки в ходе механической обработки снижает точность формы, размеров и качество поверхностей. В целях обеспечения заданных формы и размеров в технологический процесс производства вводят операции правки и рихтовки (упругопластический изгиб, растяжение, обкатка роликами и т.д.), которые негативно сказываются на эксплуатационных качествах детали, а в некоторых случаях эти операции

приводят к разрушению целостности и браку детали. Локальные остаточные деформации полотна в межреберном пространстве не поддаются правке [72]. Также операции правки и рихтовки удлиняют технологический процесс производства и увеличивают себестоимость изделия. Коробление, образующееся в процессе механической обработки, возникает из-за перераспределения остаточных напряжений при удалении припуска.

Учитывая, что главной причиной коробления маложестких деталей являются термические остаточные напряжения, разработаны математические модели, описывающие общее коробление и потерю устойчивости полотна в межреберном пространстве [1, 45, 45, 53]. Так в работах [32, 17] описаны деформации, возникающие в заготовках типа «брус» при удалении припуска:

$$f_0 = \frac{l}{8EJ} \left(\frac{a+h}{2} - 2y_c \right) \int_0^a \sigma dy \quad (1)$$

где l – длина бруса; E – модуль упругости I-рода; J – момент инерции сечения; a – величина снимаемого с заготовки припуска; h – высота заготовки; y_c – координата центра тяжести удаленной части эпюры остаточных напряжений; σ – остаточные напряжения в удаленной части изделия.

Авторы в работах [48, 38, 93] рассматривают вопросы, связанные с короблением деталей типа пластин с подкреплением. Исходя из уравнений (2) осевая сила F и изгибающий момент M , действующие на оставшуюся часть заготовки после снятия припуска описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} F &= \sigma_n^0 \cdot b \cdot h \cdot m \cdot (2 \cdot m - 1), \\ M &= \frac{a \cdot b \cdot \sigma_n^0 \cdot n^2 \cdot h}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_n^0 – величина остаточных напряжений на поверхности заготовки; b – ширина поперечного сечения детали после снятия припуска a ; h – высота поперечного сечения детали после снятия припуска a ; $m = \frac{a}{H}$ – масштабный

коэффициент; H – высота заготовки; $n = \frac{h}{H}$ – масштабный коэффициент.

Остаточные напряжения σ_x , σ_z и изгибающие моменты M_x , M_z после удаления припуска для деталей типа пластина:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -\sigma_{n,x}^0 \cdot m \cdot (2 \cdot m - 1), \\ \sigma_z &= -\sigma_{n,z}^0 \cdot m \cdot (2 \cdot m - 1), \\ M_x &= \frac{a \cdot \sigma_{n,x}^0 \cdot n^2 \cdot h}{2}, \\ M_z &= \frac{a \cdot \sigma_{n,z}^0 \cdot n^2 \cdot h}{2},\end{aligned}\quad (3)$$

где $\sigma_{n,x}^0$, $\sigma_{n,y}^0$ – величина остаточных напряжений на поверхности заготовки; b – ширина поперечного сечения детали после снятия припуска a ; $m = \frac{a}{H}$ – масштабный коэффициент; h – высота поперечного сечения детали после снятия припуска a ; $n = \frac{h}{H}$ – масштабный коэффициент.

Авторы Ю.И. Замашиков и С.К. Каргапольцев [38, 39, 48] приводят результаты исследований по описанию двухосного изгиба типа «парус» для деталей с подкреплением типа пластин построенные на параболических зависимостях:

$$\begin{aligned}f_x &= \frac{b^2}{8EJ_x} (M_x - \mu \cdot M_z), \\ f_z &= \frac{b^2}{8EJ_z} (M_z - \mu \cdot M_x),\end{aligned}\quad (4)$$

где f_x , f_z – остаточные деформации изгиба в плоскости ZOХ и ZOУ соответственно; E – модуль упругости I-рода; μ – коэффициент Пуассона; M_x , M_z – изгибающие моменты, действующие на деталь в результате удаления припуска a_1 , a_2 , a_3 , a_4 в направлении осей OХ и OZ соответственно; J_x , J_z – моменты инерции поперечного сечения детали в плоскостях XOУ и ZOУ.

Так же, большое значение имеют работы, направленные на изучение

остаточных деформаций полотна подкрепленной ячейки (рис. 4). В работах [72, 65] приведены результаты анализа, из которого следует вывод о наибольшем количестве дефектов маложестких деталей, возникающих в процессе производства, по причине больших остаточных деформаций полотна подкрепленной ячейки.

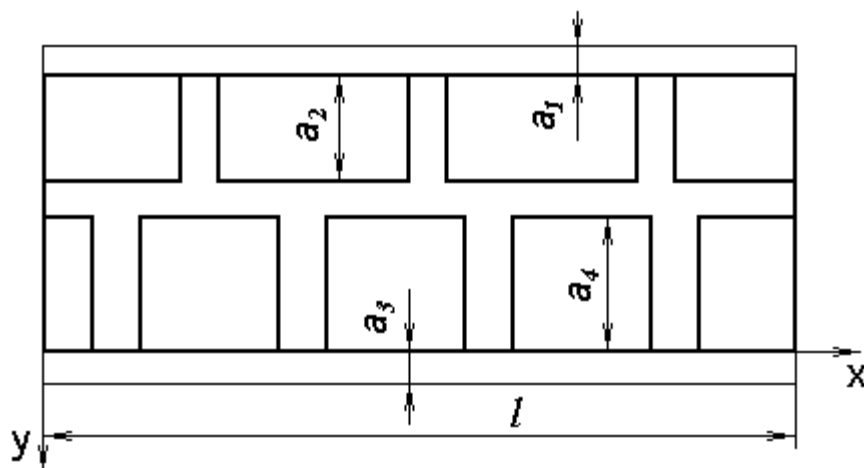


Рисунок 4 – Поперечное сечение подкрепленной маложесткой детали

Остаточные деформации полотна ячейки приводят к прослаблению полотна ячейки, формированию ступенчатых зарезов и саморазрушению полотна. При этом правка остаточных деформаций полотна [65] ячейки подкрепленной с четырех сторон (рис. 5 а) почти не поддается, а деформации полотна ячейки подкрепленной с трех сторон (рис. 5 б) вообще не поддается рихтовке.

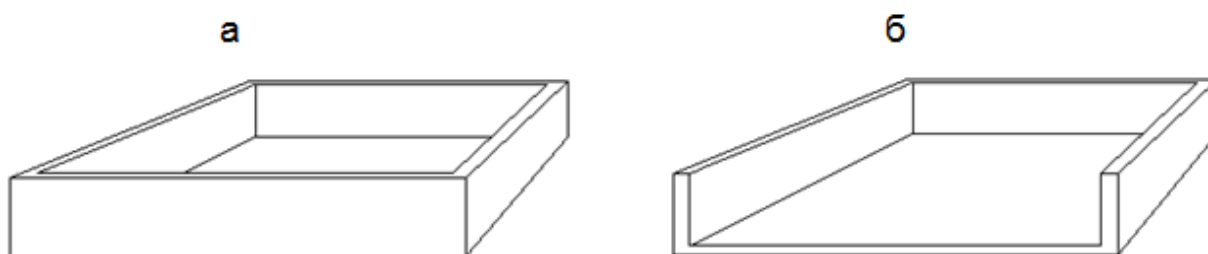


Рисунок 5 – Виды подкреплений ячеек маложесткой детали

В работе А.И. Промптова и С.И. Ботвенко [93] определены условия отсутствия локальной потери устойчивости полотна подкрепленной ячейки маложесткой детали, возникающие при перераспределении остаточных напряжений в процессе снятия припусков на механическую обработку:

$$\sigma_p < \frac{c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot J_y^2}{k(2 \cdot k - 1 + \frac{3 \cdot h}{H}) \cdot h \cdot b^2 \cdot (J_y - F y_c^2)}, \quad (5)$$

где σ_p – остаточные напряжения на поверхности плиты; c_1, c_2, c_3 – коэффициенты, учитывающие принятые допущения; J_y – момент инерции поперечного сечения подкрепленного полотна; E – модуль упругости I-рода; $k = \frac{a}{h}$; a – толщина удаляемого припуска с заготовки; h – толщина подкрепленного полотна; H – толщина образца; b – ширина подкрепленного полотна; F – площадь поперечного сечения подкрепленного полотна; y_c – эксцентриситет точки приложения сосредоточенной силы.

Однако, зависимость (5) не учитывает изгибающие моменты, возникающие в заготовке при удалении припуска, которые зависят от величины остаточных напряжений и толщины заготовки. Прогнозирование остаточных напряжений и деформаций при обработке маложестких деталей с двух сторон полотна маложесткой детали, возможно, если принимать характер шарнирного опирания подкрепляющего ребра на полотно. Учитывая вышеприведенные недостатки, на основании условий (5) потери устойчивости полотна, в работе [65] автор приводит зависимости для определения критических значений сжимающих напряжений $\sigma_{X,кр}$, $\sigma_{Z,кр}$, соответствующих потери устойчивости полотна ячейки (6):

$$\begin{aligned}
\sigma_{X,кр} &= K_X \cdot \frac{\pi^2 \cdot D}{b^2 \cdot h}, \\
\sigma_{Z,кр} &= \varphi \cdot \sigma_{X,кр}, \\
K_X &= \frac{\left[\left(\frac{m}{\alpha} \right)^2 + n^2 \right]^2}{\left(\frac{m}{\alpha} \right)^2 + \varphi \cdot n^2}, \\
\alpha &= \frac{a}{b}, \\
\varphi &= \frac{\sigma_{Z,кр}}{\sigma_{X,кр}},
\end{aligned} \tag{6}$$

где $\sigma_{X,кр}$, $\sigma_{Z,кр}$, – критические сжимающие напряжения; K – коэффициент устойчивости; a и b – габаритные параметры полотна подкрепленной ячейки мало жесткой детали; m , n – количество полуволн изгиба полотна подкрепленной ячейки мало жесткой детали в направлении осей X и Z соответственно; D – приведенная жесткость полотна подкрепленной ячейки мало жесткой детали; a , b – габаритные размеры полотна подкрепленной ячейки мало жесткой детали.

Так же в работе [65] определен характер влияния расположения подкрепленного полотна в пределах контура заготовки на величину его локальной деформации, установлена нелинейная зависимость локальных деформаций изгиба полотна от его толщины, раскрыто влияние подкреплений полотна отдельной ячейки детали с тремя и четырьмя ребрами на характер его локальной остаточной деформации. Приведены технологические рекомендации по формированию оптимального технологического процесса, направленного на снижение уровня остаточных деформаций полотна подкрепленной ячейки:

- изменение положения детали относительно контура заготовки;
- корректировка условий термической обработки;
- правка заготовок;
- изменение соотношения сторон подкрепленной ячейки.

Помимо исследовательских работ направленных на изучение зависимостей остаточных деформаций от различных факторов производства мало жестких

деталей, формы, размеров и материала заготовки, проведены исследования направленные на снижение коробления мало жестких деталей при механической обработке, которые используют ряд методов. Эти методы можно разделить на две основные группы:

1. методы, направленные на снижение уровня напряжений и деформаций;
2. методы, направленные на проектирование оптимального технологического процесса, обеспечивающего приемлемый уровень деформаций.

К первой группе необходимо отнести методы, направленные на корректировку условий термической обработки, упругопластическое деформирование заготовки и детали и вибрационные методы.

Как было сказано выше, пластические деформации вызывающие остаточные напряжения возникают в процессе термической обработки из-за неравномерного охлаждения и возникновения большого градиента температур ΔT по толщине заготовки. Поэтому, для снижения уровня остаточных напряжений, производят корректировку условий термической обработки (закалка и старение) в сторону снижения скорости охлаждения заготовок. Так в работах [6, 36, 54, 61, 92] представлены результаты работ по исследованию зависимости уровня остаточных напряжений от условий (состав, температура, условия подачи закалочной жидкости) закалки. Описывается снижение уровня остаточных напряжений σ на 20-70 % в зависимости от повышения температуры пресной воды используемой в качестве закалочной жидкости от 10 до 100°C. Так же в работе [24] приводятся результаты исследования снижения коробления на 20 % при закалке в жидком азоте. Снижение коробления объясняется более низкой скоростью охлаждения $v_{\text{охл}}$. Учитывая, что разница температур ΔT между охлаждаемой заготовкой и закалочной средой выше, скорость охлаждения $v_{\text{охл}}$ в азоте должна быть выше, чем при охлаждении в воде, однако возникает обратная ситуация. Охлаждение в жидком азоте характеризуется меньшей скоростью охлаждения $v_{\text{охл}}$, такое явление обуславливается образованием плотной газовой

рубашки вокруг охлаждаемого тела, которая снижает скорость охлаждения $v_{\text{охл}}$. Поэтому, закалку в жидком азоте для алюминиевых сплавов применяют только для изделий сравнительно небольшой толщины, не более 5 мм. В работе [100] предложена закалка в подогретом масле после проведения химико-термической обработки, которая так же приводит к снижению остаточных напряжений и уменьшению брака при изготовлении деталей зубчатое колесо и вал-шестерня. В настоящее время при проведении термической обработки (закалки) все большее распространение получают полимерные закалочные среды [131]. Это среды на основе полигликолей, полиакрилатов, целлюлозы обладают различной охлаждающей способностью и могут варьироваться в зависимости от состава. Использование полимерных закалочных сред и специального закалочного оборудования приводит к снижению остаточных напряжений и коробления заготовок из алюминиевых сплавов в 2 раза [46]. К этой же группе методов необходимо отнести способы снижения остаточных напряжений обработкой холодом [132]. Способ заключается в создании температурного градиента ΔT между поверхностью и центром противоположного градиенту температур ΔT возникающему при закалке. Достигается такой температурный градиент ΔT при охлаждении заготовки в жидком азоте до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ или углекислоте до температуры $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, вследствие чего возникают температурные напряжения противоположные по знаку напряжениям возникающим при закалке, что приводит к релаксации остаточных напряжений.

Все вышеперечисленные методы корректировки условий термической обработки приводят к снижению остаточных напряжений путем понижения скорости охлаждения, но эти методы имеют один важный недостаток - снижение скорости охлаждения приводит к снижению прочностных свойств и коррозионной стойкости материала заготовок и деталей, что для многих случаев является неприемлемым. Поэтому используют упругопластические (механические) методы снижения остаточных напряжений. Механические методы

основаны на формировании по телу заготовки (детали) небольших пластических деформаций (0,5-2%) при растяжении (сжатии), изгибе в нормальных условиях [24, 132, 57, 44]. В работе [57] отмечают снижение уровня остаточных напряжений в 10 раз в заготовке из алюминиевого высокопрочного сплава В95, закаленного и состаренного, после деформации растяжением. К механическим методам релаксации остаточных напряжений так же необходимо отнести методы, заключающиеся в применении циклического нагружения [115, 122]. Так же видится перспектива релаксации остаточных напряжений при одновременном температурном и циклическом нагружении, однако этот вопрос подробно не изучен из-за сложности контроля уровня напряжений в процессе подобного воздействия.

Снижение уровня остаточных напряжений так же производят при роликовой правке [132]. Данный способ основан на принципе повторных перегибов и менее эффективен и его труднее контролировать, чем пластическое деформирование при растяжении [20].

Так же для изменения уровня и знака остаточных напряжений в изделии применяют поверхностный наклеп [20], формирующий сжимающие напряжения, при пластическом деформировании, в поверхностном слое изделия при обкатке роликами и дробеструйной обработке. Поверхностный наклеп так же увеличивает усталостную прочность и уменьшает чувствительность к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Еще один способ, относящийся к первой группе методов направленных на снижение остаточных напряжений и деформаций – это вибрационный (акустико-механический) способ. Данный способ основан на формировании малых пластических деформаций, которые способствуют релаксации остаточных напряжений. Так при ультразвуковой обработке происходит снижение уровня остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей на 30-40% [132], при вибрационной обработке на низких резонансных частотах уровень остаточных

напряжений снижается до 50% от первоначальных значений.

К главным недостаткам механических способов релаксации остаточных напряжений следует отнести снижение механических свойств материала заготовки, особенно предела текучести σ_T при циклическом нагружении, возможность использования только для деталей простой формы с постоянным сечением в направлении деформирования, необходимость специального прессового оборудования.

Вторая группа методов снижения коробления направлена на оптимизацию технологического процесса, при котором релаксация остаточных напряжений в результате снятия припусков с заготовки не будет приводить к остаточным деформациям маложесткой детали, превышающим допустимых значений [65]. Так в технологическом процессе обработки заготовок при производстве деталей малой жесткости производят предварительный изгиб заготовки (рисунок 6) в зоне упругих деформаций [91, 65, 52] с целью сформировать изгибающий момент противоположного знака, моменту, который формируется при снятии припуска.

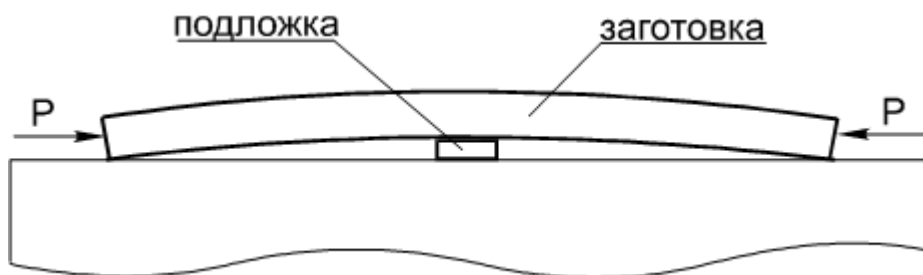


Рисунок 6 – Предварительный изгиб заготовки

В зависимости от величины припуска и габаритов заготовки определяют величину предварительного изгиба и в результате снижают остаточные деформации, возникающие в процессе механической обработки.

В работе [85] представлен способ обработки плоских поверхностей нежестких заготовок. Данный способ позволяет сформировать напряжения, при механической обработке заготовок (авиационных панелей, различных планок и плит), уравнивающие остаточные напряжения, изменяя режимы резания (скорость резания, подача, глубина резания) и локальное термическое воздействие

(нагрев и охлаждение слоя металла, подлежащего деформированию при резании), с целью формирования деформаций в заданных пределах.

При такой обработке деталь получает деформации в разных направлениях не превышающие предельные значения. Так как механическая обработка производится после термической, локальный разогрев материала заготовки может привести к распаду перенасыщенного твердого раствора, формируемого в процессе закалки и как следствие снижение механических характеристик и коррозионной стойкости материала заготовки.

Авторы [48, 24, 38] описывают метод перераспределения припусков для заготовок с двусторонним оребрением. Суть метода заключается в формировании заготовок имеющих одинаковую величину припуска с обеих сторон, необходимого для компенсации возникающих деформаций. Так же в работе [14] представлены результаты исследования по определению оптимальной величины припуска и расположения детали относительно заготовки (рис. 7) с целью получения минимального уровня остаточных напряжений в детали и последующего снижения коробления при механической обработке.

Согласно результатам данного исследования, оптимальным является формирование припуска величиной в 4 мм для получения наименьшего уровня остаточных напряжений и деформаций.

В работе [52] предлагается метод минимизации остаточных деформаций основанный на изменении последовательности обработки частей заготовки. Остаточные деформации, возникающие при определенной последовательности обработки частей заготовки с разной площадью взаимно компенсируются, что в результате приводит к общим деформациям детали в пределах допустимых значений.

Приведенные технологические рекомендации, направленные на снижение уровня остаточных деформаций, основываются на данных о распределении остаточных напряжений, полученные разрушающими методами определения, что

негативно сказывается на себестоимости производства маложестких деталей. Так же важно отметить, что проведение растяжения с остаточной деформацией, снижающей уровень остаточных напряжений, препятствует определению остаточных напряжений после релаксации. Важно отметить, что снижение уровня остаточных деформаций путем корректировки условий термической обработки, удовлетворяющим требованиям по повышению механических свойств материала заготовки, будет малоэффективным без контроля процесса охлаждения путем его моделирования. Поэтому, наиболее перспективным путем минимизации остаточных напряжений и деформаций маложестких деталей, возникающих при производстве, видится математическое моделирование, позволяющее прогнозировать остаточные напряжения.

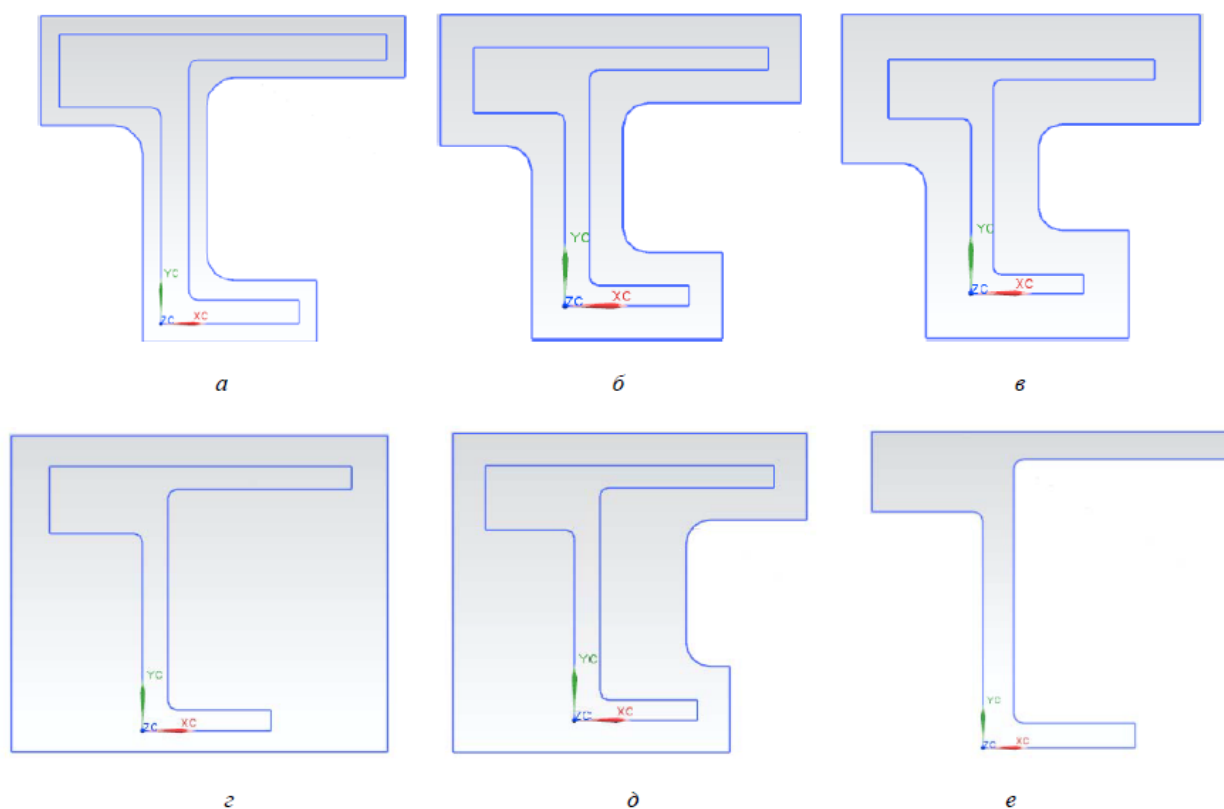


Рисунок 7 – Общий вид сечения детали с припуском, где а – равномерный припуск 4 мм, б – равномерный припуск 8 мм, в – равномерный припуск 12 мм, г – неравномерный припуск от 8 до 18 мм, д – заготовка прямоугольной формы с неравномерным припуском, е – сечение детали без припуска

1.3. Математическое моделирование остаточных напряжений малоэластичных деталей

Математическое моделирование процессов, вызывающих остаточные напряжения, активизировалось благодаря появлению современных программных расчетных комплексов, основанных на использовании метода конечных элементов. На сегодняшний день широкое распространение получили программные продукты MSC Nastran, Marc, Sinda, Adams, Dytran, Abaqus, Ansys, QForm, Fluent, Sysweld, Star-CD и другие.

Так, значительное количество работ, выполненных при помощи перечисленных программных комплексов, посвящено моделированию технологических процессов, в процессе которых формируются остаточные напряжения. При этом, различные математические модели формирования остаточных напряжений, возникающих в процессе различных технологических процессов, значительно отличаются друг от друга по методам построения и способам их реализации.

В работе [73] проведено моделирование процесса образования остаточных напряжений при охлаждении цилиндрических поковок, а так же проведен анализ влияния температурных и остаточных напряжений на диффузию водорода и образование флокенов. Учитывая медленное охлаждение цилиндрической поковки на воздухе, развитие ползучести, возникающей под действием температуры и упругих напряжений, приводит к уменьшению напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= E \frac{\Delta l_0}{l_0} = E \varepsilon_0 \\ \varepsilon_0 &= \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{II} \\ \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma(\tau, T)}{\partial \tau} &= -\varepsilon_{II} \\ \frac{1}{E} d\sigma(\tau, T) &= -d\varepsilon_{II}\end{aligned}\tag{7}$$

где σ_0 - упругие напряжения, возникающие при упругом растяжении

образцов, длиной l_0 на величину Δl_0 ; ε_0 - упругие деформации, возникающие при упругом растяжении; ε_{II} - пластическая деформация, возникающая в процессе ползучести; E - модуль упругости материала; τ - время выдержки при повышенной температуре, в течении которого происходит ползучесть; T - температура выдержки.

Если для данного материала известна деформация ползучести ε_{II} , как функция напряжения и температуры, то уравнение (7), позволяет установить связь дифференциалов напряжений и температуры, необходимую для численных расчетов.

Так же в процессе моделирования выявлен характер распределения остаточных напряжений по толщине заготовки, которые изменяются от сжимающих на поверхности до растягивающих в центре.

Описанные аналитические зависимости, приведенные в работе, хорошо подходят для описания остаточных напряжений, сформированных в условиях медленного охлаждения стальных поковок в α -области, но для определения остаточных напряжений в условиях ускоренного охлаждения в закалочных средах при более высоких температурах нагрева требуют значительной доработки.

Так же широкое развитие получили методы поверхностного пластического деформирования, основу которых составляет принцип формирования сжимающих напряжений в поверхностном слое, которые обеспечивают необходимый комплекс свойств. Одним из способов поверхностного пластического деформирования является дробеструйная обработка. Для целенаправленного регулирования процесса дробеструйной обработки, в зависимости от требуемых свойств поверхностного слоя, необходимо изучение процесса с использованием математического моделирования. Так в работе [63] получены аналитические зависимости для расчета остаточных напряжений в плитах после дробеструйной обработки (рис. 8):

$$\begin{aligned}
0 \leq z \leq h_s \\
\sigma_r^0(r) &= \left[\left(1 - \frac{1}{h_s}\right) - C_1(t-z) - \frac{h_s}{4t} \right] \sigma_{r,0} \\
h_s \leq z \leq 2t \\
\sigma_r^0(r) &= - \left[C_1(t-z) + \frac{h_s}{4t} \right] \sigma_{r,0}
\end{aligned} \tag{8}$$

где z – текущая координата; h_s – глубина наклепанного слоя; z_0 – глубина распространения сжимающих напряжений, $z = kh_s$ – глубина залегания максимальных сжимающих напряжений при их спаде на глубине $0 < z < kh_s$; $2t$ – толщина пластины (детали); $C_1 = \frac{3}{4} \frac{h_s}{t^3} \left(t - \frac{h_s}{3}\right)$ – расчетный коэффициент;

$\sigma_{r,0} = - \frac{\sigma_{i,0}}{1 - C_1 - \frac{h_s}{4t}}$ – нагрузочные напряжения на поверхности; $\sigma_{i,0} = S_b + E'(\varepsilon_{i,0} - \varepsilon_p)$ –

интенсивность напряжений, отвечающая интенсивности деформации в центре единичного отпечатка $\varepsilon_{i,0}$; $E' = \frac{S_k - S_b}{\varepsilon_k - \varepsilon_p}$ – модуль упрочнения в пластической

области; равномерная деформация $\varepsilon_p = \frac{245}{НД}$ (здесь НД – пластическая твердость определяемая по ГОСТ 18835-73).

На основе разработанных математических моделей сформированы зависимости наибольшей глубины наклепанного слоя, наибольших сжимающих напряжений, заданного их градиента от условий дробеструйной обработки. Приведенные аналитические зависимости позволяют прогнозировать комплекс эксплуатационных свойств в зависимости от параметров дробеструйной обработки, однако среди перечисленных параметров обработки отсутствует температура нагрева и ее влияние на формирование остаточных напряжений. Учитывая выводы, приведенные в работе [103], говорящие о необходимости сочетания нагрева и операций поверхностного пластического деформирования, обеспечивающих повышенную коррозионную стойкость деталей, встает вопрос о

необходимости проведения исследования в данном направлении.

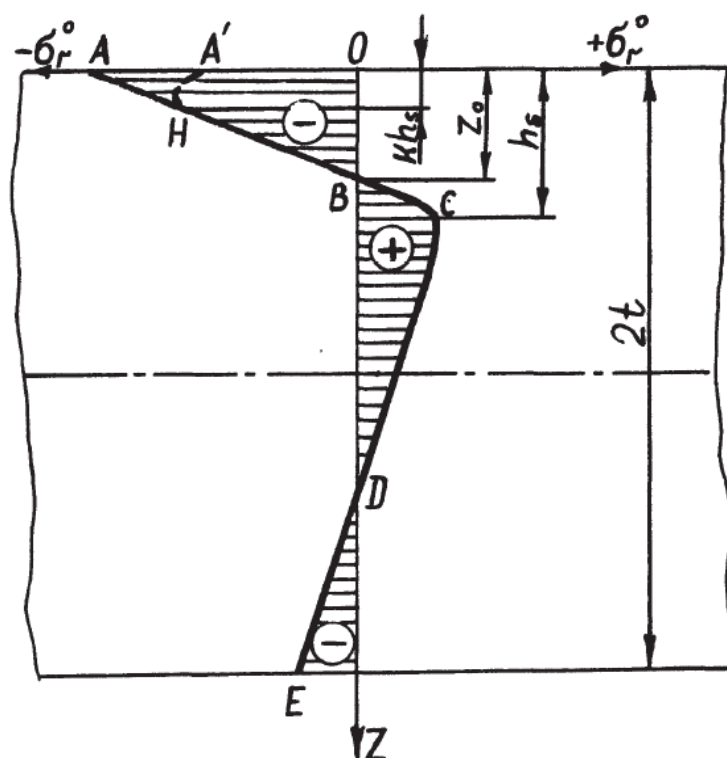


Рисунок 8 – Эпюра остаточных напряжений в детали после дробеструйной обработки

Кроме дробеструйной обработки поверхностное пластическое деформирование производят накатыванием роликом и алмазным выглаживанием. Составленные математические модели позволяют описывать распределение остаточных напряжений при перечисленных технологических операциях [98, 96, 95]. Однако, анализ экспериментальных данных и результатов расчетов, выполненных в перечисленных работах, показывает их несовпадение [106] при определенных режимах алмазного выглаживания, накатывания роликом и других технологических операциях. Таким образом, в работе [106] предложена феноменологическая теория, включающая формализацию разработанной математической модели с учетом анизотропии процесса упрочнения. Так аналитические зависимости, сформированные в представленной работе [106],

позволяют рассчитать поля остаточных пластических деформаций в упрочненном слое цилиндрического образца:

$$q_{\theta}(r) = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E(1+\alpha\mu)^2} r^{-(2+\alpha)/(1+\alpha\mu)} \int_{\xi}^{\xi^{(1+\alpha-\alpha\mu)/(1+\alpha\mu)}} \left[\sigma_r^{res}(\xi) + (1+\alpha)\sigma_{\theta}^{res}(\xi) \right] d\xi - \frac{(1+\mu)}{E(1+\alpha\mu)} \left[(1-\mu)\sigma_{\theta}^{res}(r) - \mu\sigma_r^{res}(r) \right] \quad (9)$$

$$q_z = \alpha q_{\theta}, 0 < \alpha < \infty$$

$$q_r = -(1+\alpha)q_{\theta}$$

где q_z , q_{θ} - осевая и окружная компоненты остаточных пластических деформаций; α - феноменологический параметр, учитывающий анизотропию распределения полей остаточных деформаций; E - модуль Юнга материала; μ - коэффициент Пуассона материала; σ_{θ}^{res} , σ_r^{res} - окружные и осевые напряжения; r - радиус заготовки.

Рассмотренные аналитические зависимости в работе [106] учитывают анизотропию процесса упрочнения, но, к сожалению, так же как и в математических моделях работы [63] не учтено влияние изменения температуры на изменение свойств и механических напряжений, возникающих в процессе поверхностного пластического деформирования.

С целью повышения прочности, твердости, износостойкости и коррозионной стойкости поверхностного слоя изделий, помимо поверхностного пластического деформирования, широко применяют плазменное напыление, суть которого заключается в нанесении покрытия из различных материалов при помощи плазменной струи. В процессе нанесения плазменных покрытий происходит разогрев напыляемого материала и основы, на которую происходит напыление. В результате неравномерного теплового расширения основы возникают температурные напряжения и деформации, которые в процессе охлаждения приводят к разрушению плазменного покрытия. Поэтому приведена работа по моделированию процесса развития остаточных напряжений при

формировании плазменных покрытий [59]. Остаточные напряжения возникают при нанесении плазменных газотермических покрытий. Это явление объясняется теплообменом основного изделия с окружающей средой, струей разогретого газа (плазмы) и частицами напыляемого материала, вследствие чего происходит изменение линейных размеров уже напыленного покрытия и подложки. Напряженно-деформированное состояние изделия при нанесении плазменных покрытий описывается:

$$\begin{aligned} T^+(x_i, t) = T_0(x_i, t); u^+(x_i, t) = u_0^+(x_i, t), \sigma_{ij}^+(x_i, t) = \sigma^+(x_i, t); \\ \frac{\partial u^+(x_i, t)}{\partial t} = v^+(x_i, t); x_i \in \Omega^+; t = t_k; i, j = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (10)$$

где $T^+(x_i, t)$ - температурное поле; u - вектор перемещений; σ_{ij} - тензоры напряжений; Ω^+ - область основного изделия с напыленным покрытием при $t \leq t_k$.

при $t_k \leq t < t_m$ к участку границы L_{12}^+ тела W осуществляется подвод тепла, происходит его разогрев, возникает некоторая система температурных деформаций и напряжений, тогда граничные условия (11), при этом вопросы сходимости, существования, единственности и устойчивости могут быть решены на основе конкретных граничных условий и уравнений состояния. Сформированные модели позволяют обеспечивать формирование плазменных покрытий с заданным комплексом механических свойств [59].

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}^+ + y_i^+ - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_i^+ = 0, \Delta(\lambda T^+) = \rho C \frac{\partial T^+}{\partial t}; \\ \varepsilon_{ij}^+ = f(u_i^+, u_{ij}^+), \varepsilon_{ij}^+ = f_1(\sigma_{ij}^+, T^+, x, t_i); \\ x_i \in \Omega, \frac{\partial T^+}{\partial n} = f_2(T^+, T_1, T_2), x_i \in L_{12}^+; \\ u_i^+ = f_5(x_i, t), x_i \in L_{11}^+, \frac{\partial T^+}{\partial n} = f_3(T^+, T_2); \\ x_i \in L_1^+, \sigma_{ij} n_j = f_4(x_i, t); \\ x_i \in L_{13}^+, t \in (t_k, t_m), i, j = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (11)$$

где $\frac{\partial T^+}{\partial n}$ - производная от температуры по нормали к границе L^+ ;
 $\bar{n} = (n_1, n_2, n_3), \lambda, \rho, C_p$ - теплофизические параметры области Ω^+ ; y_i^+ - плотность
объемной силы.

Полученные износостойкие покрытия, с целью снижения шероховатости поверхности, подвергают дальнейшей механической обработке (шлифование, финишная лезвийная обработка). В процессе шлифования на поверхности возникают растягивающие остаточные напряжения, а в процессе финишной механической обработки – сжимающие. Учитывая положительное влияние сжимающих остаточных напряжений на поверхности на усталостную прочность изделия, с целью повышения эксплуатационных характеристик преимущественно производят механическую обработку. Режимы механической обработки влияют на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя изделия, так, например, если пик сжимающих напряжений приходится на границу между износостойким покрытием и деталью, то это приводит к разрушению напыленного слоя. Поэтому в работе изучен [22] вопрос формирования остаточных напряжений при точении поверхностей с износостойкими покрытиями. Суть работы заключается в разработке методики определения картины остаточных напряжений, в поверхностном слое после токарной обработки, необходимых для увеличения прочности и выносливости материала изделия. Расчетная модель описывает зависимость формируемых остаточных напряжений от режимов резания, геометрических параметров режущего инструмента, ширины срезаемого слоя:

$$\begin{aligned}
P_i &= C \frac{S^{X_s} h_3^{X_l} \delta^{X_\delta}}{V^{X_v}} \\
\left. \begin{aligned}
\varepsilon \leq \varepsilon_{np} \sigma &= E \varepsilon \\
\varepsilon \geq \varepsilon_{np} \sigma &= \sigma_{\Pi} - E'(\varepsilon_{\Pi} - \varepsilon)
\end{aligned} \right\} \\
\varepsilon_{np} &= \frac{\sigma_{\Pi} - K \varepsilon_{np}}{E - E'} \\
K &= \frac{\sigma_{\Pi} - \sigma_T}{\varepsilon_{\Pi} - \varepsilon_T}
\end{aligned} \tag{12}$$

где S – подача, мм/об; h_3 - ширина площадки износа на задней поверхности резца, мм; δ - угол резания; V – скорость резания, м/мин; $C, X_s, X_l, X_\delta, X_v$ - экспериментально определяемые коэффициенты; σ_{Π} - предел прочности; ε_{Π} - деформация, соответствующая пределу прочности; σ_T - предел текучести; ε_T - деформация, соответствующая пределу текучести; E – модуль упругости; E' – скорректированное значение модуля упругости при деформировании свыше предела текучести.

Интересной особенностью представленной модели является учет пластического деформирования обработанной поверхности задней поверхностью резца, основанный на методике расчета напряжений при выглаживании [58]. Расчет напряжений по глубине, возникающих в процессе токарной обработки производят методом последовательного приближения с переменными параметрами упругости [17]. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов финишной токарной обработки поверхностей с износостойкими покрытиями при скоростях более 60 м/мин.

Подавляющее большинство прочностных расчетов конструкций производится без учета остаточных напряжений, принимая во внимание лишь внешние статические, динамические и циклические нагрузки. Учитывая высокие значения и характер распределения остаточных напряжений важно учитывать эту составляющую, непосредственно влияющую на долговечность и надежность всей конструкции. Так в статье [67] предпринята попытка создания методики прочностного расчета с учетом предварительного напряженного состояния,

основанной на численном конечно-элементном моделировании остаточных напряжений в арочном тонкостенном прокате трапециевидного сечения. Моделирование проведено в программном комплексе MSC Nastran, с использованием режима Nonlinear static, с автоматическим пошаговым приращением нагрузки. В работе представлены результаты численного моделирования процесса радиусного изгиба плоских профилированных листов, в виде распределения остаточных напряжений по высоте сечения профиля. Полученные результаты позволяют производить уточненный прочностной расчет несущей способности профилей цилиндрических бескаркасных сооружений на стадии проектирования.

К деталям малой жесткости можно отнести широкую номенклатуру изделий машиностроения. К основным проблемам изготовления маложестких деталей стоит отнести коробление в процессе изготовления. Наиболее широко известна проблема изготовления маложестких валов, связанная с короблением в процессе производства и его негативное влияние на точность геометрических параметров и технические характеристики. В работе [34] приведены результаты моделирования термосиловой обработки маложестких валов, испытывающих остаточные деформации, повышающих биение. Причиной возникновения коробления маложестких валов является отсутствие обеспечения условия совместности упругопластических деформаций, при термической обработке. С целью минимизации и выравнивания уровня остаточных напряжений проводят термосиловую обработку валов путем закрепления валов в стапель при термообработке. Для дальнейшего прогнозирования биения валов после термосиловой обработки и корректировки ее условий описывают математическую модель термосиловой обработки:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \sigma_1 / E + \alpha_p T^o; \\
\varepsilon_2 &= -\mu \sigma_1 / E; \\
\varepsilon(t) &= \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i^Y(t) + \varepsilon_i^B(t)); \\
E_2 \varepsilon_1 + \beta \varepsilon_1 &= (1 + E_2 / E_1) \sigma_{1\Sigma} + \beta / E_1 \sigma_{1\Sigma}; \\
\sigma_1^T &= E \alpha T^o; \\
\varepsilon_{1\Sigma} &= \varepsilon_1 + \varepsilon_1^T; \\
\sigma_1 &= \sigma_p; \\
\varepsilon_1^T &= \alpha T^o; \\
\varepsilon_2 &= -\mu \sigma_1 / E; \\
\sigma_{1\Sigma} &= \sigma_1 + \sigma_1^T
\end{aligned} \tag{13}$$

где $\varepsilon_i^Y(t)$, $\varepsilon_i^B(t)$ - девиаторы тензоров упругой и вязкой деформации для i -го блока; N – общее число блоков, которое определяется расположением зон пучностей и узлов колебаний до 6 гармоники включительно; $E_1 E_2$ - модули упрочнения и упругости; β - коэффициент вязкости; $\varepsilon_{1\Sigma}$ - суммарная деформация; σ_p - напряжения растяжения от разницы удлинения стапеля и заготовки; μ - коэффициент Пуассона.

Модель основана на расчете упругопластической деформации с учетом температурнозависимых коэффициентов линейного температурного расширения стапеля и детали. В процессе разработки математической модели, опытным путем определяют наибольшее соответствие с экспериментальными данными модели Прандтля. Моделирование, выполненное на основе модели упруго-пластического тела, позволяет выявить зависимость локальной деформации и биения вала от технологических параметров процесса термосиловой обработки. Основная особенность приведенной модели заключается в описании взаимодействия стапеля и обрабатываемой при совместном изменении линейных размеров, от температуры и скорости охлаждения.

Среди публикаций на тему остаточных напряжений присутствуют работы по расчету сварочных напряжений и их влияние на коробление сварных конструкций. Так в работе [105] представлены результаты численного

конечноэлементного моделирования релаксации остаточных напряжений путем глубокого пластического деформирования сварного шва в программном комплексе ANSYS Workbench. Численное моделирование релаксации остаточных напряжений в сварном шве позволяет корректировать условия глубокого пластического деформирования с целью минимизации коробления. Однако, некоторые представленные результаты моделирования имеют значительную погрешность, причиной которой является не недостаточная точность определения механических свойств материала сварных деталей, а также сложность определения температурного поля сварных деталей в процессе охлаждения.

Учитывая актуальность проблемы, связанной с короблением сварных соединений под действием остаточных напряжений, разработан комплекс конечно-элементного моделирования процессов термической обработки и сварки Sysweld, с учетом структурных превращений, изменения свойств материала заготовки в зависимости от температуры. Так в работе представлены результаты моделирования остаточных напряжений и деформаций, возникающих в процессе сварки стальной цистерны. Расчеты остаточных напряжений, учитывающие изменение структурных составляющих, производились с на основе моделей Койстинена-Марбургера (14) и Леблота(15):

$$P(T) = 1 - \exp(-b \cdot (M_s - T)) \quad (14)$$

P – количество образовавшегося мартенсита; T – температура; M_s – температура начала мартенситного превращения; b – константа.

$$\frac{dP(T)}{dt} = f(T) \frac{P_{eq}(T) - P(T)}{\tau(T)} \quad (15)$$

P_{eq} – первоначальное количество металлургической фазы; P – доля фазы, претерпевающей превращение; $\tau(T)$, $f(T)$ – константы реакции.

Важно отметить, что приведенные результаты отражают влияние температурных напряжений, возникающих из-за разницы температур, а так же структурные напряжения, в зависимости от скорости охлаждения. Используемый

в приведенной работе специализированный программный комплекс позволяет рассчитывать величину остаточных напряжений и деформаций при изменении температуры, однако, не позволяет в дальнейшем производить расчеты напряженно-деформированного состояния при других технологических операциях.

Касательно технологического процесса производства маложестких деталей из алюминиевых сплавов, остаточные напряжения образуются при производстве заготовок высокопроизводительными способами обработки металлов давлением, проведении термической обработки, механической обработке, а также при операциях правки и рихтовки [8, 9, 10].

На этапе термической обработки заготовок, которая заключается в проведении закалки и искусственного старения, происходит нагрев выше температур рекристаллизации и все остаточные напряжения, возникшие при операциях формовки, проката, штамповки снимаются, происходит процесс разупрочнения металла. Так как в авиастроении для производства крупногабаритных маложестких деталей используются алюминиевые сплавы, при термической обработке не происходит изменения кристаллической решетки (полиморфных превращений), как в сталях, поэтому процессы образования остаточных напряжений возникающих от фазовых превращений в данной работе рассматриваться не будут. Основной причиной образования остаточных напряжений при термической обработке является неравномерное охлаждение и образование температурных напряжений превышающих предел текучести материала заготовки и как следствие образование неравномерных пластических деформаций.

Распределение и величина остаточных напряжений, возникающих в процессе термической обработки, хорошо изучены в заготовках простой формы, но практически не исследованы в заготовках более сложной формы. Так в работах [48, 55, 1] описывают локализацию остаточных напряжений в заготовках типа

«плита» параболическими зависимостями:

$$\begin{aligned}\sigma_z^0(y) &= \sigma_{n,z}^0 \cdot \left(\frac{6}{H_2} y^2 - \frac{6}{H} y + 1\right) \\ \sigma_x^0(y) &= \sigma_{n,x}^0 \cdot \left(\frac{6}{H_2} y^2 - \frac{6}{H} y + 1\right)\end{aligned}\tag{16}$$

где $\sigma_{n,z}^0$, $\sigma_{n,x}^0$ – остаточные напряжения на поверхности заготовки соответственно в плоскостях ZOY и XOY; H – толщина образца; y – расстояние от рассматриваемой точки до поверхности плиты.

При дальнейшей механической обработке возникающие остаточные напряжения от процесса резания имеют низкие значения по сравнению с термическими остаточными напряжениями, поэтому при исследовании общего и локального коробления их не учитывают [52]. Учет остаточных напряжений возникающих в процессе резания производят лишь при обработке изделия толщиной не более 1 мм [72].

Для снижения уровня термических остаточных напряжений производят продольное растяжение плит, вследствие чего величина пластических деформаций по толщине стабилизируется, а величина остаточных напряжений снижается.

Таким образом, проведя анализ существующих математических моделей формирования остаточных напряжений, можно сделать вывод, что они характеризуются узкой специализацией, что обусловлено различием физических процессов, вызывающих деформации и напряжения. Основная часть существующих работ выполнена с использованием современных высокопроизводительных программных комплексов, реализующих численные методы расчета, но в данном случае важно отметить, что их использование не обеспечивает решение всех проблем, так как в каждом конкретном случае необходимо дополнительное определение специфических параметров, характеризующих процесс формирования остаточных напряжений.

Исходя из вышеизложенного, сформулирована цель диссертационной

работы – разработка системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений на основе алгоритма идентификации температурозависимых параметров термической обработки при производстве маложестких деталей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать систему компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей.

2. Разработать алгоритм идентификации температурозависимых параметров математической модели, характеризующих процесс нагрева (охлаждения) с высокой степенью универсальности.

3. Разработать математическую модель формирования нестационарных тепловых полей заготовки в процессе проведения термообработки, с учетом температурозависимых теплофизических свойств материала.

4. Провести исследование формирования термических остаточных напряжений и предложить пути их минимизации на основе использования разработанной системы компьютерного моделирования на примере закалки заготовок из алюминиевых сплавов.

2 Математическое моделирование процесса термической обработки заготовок

2.1 Постановка задачи моделирования остаточного напряженно-деформированного состояния

Термическая обработка заготовок заключается в проведении закалки и искусственного старения [43, 72]. В процессе закалки происходит быстрое неравномерное охлаждение заготовки, которое формирует уровень температурных напряжений, превышающий предел текучести материала, что в свою очередь приводит к возникновению неравномерных пластических деформаций заготовки. При полном охлаждении заготовки до равномерной температуры по всему телу, неравномерные пластические деформации приводят к возникновению термических остаточных напряжений.

Таким образом, расчет уровня и распределения остаточных напряжений напрямую связан с определением величины и локализации неравномерных пластических деформаций. Для определения величины и распределения пластических деформаций необходимо рассчитать значения температурных напряжений, возникающих при неравномерном охлаждении с учетом изменяющихся механических свойств материала заготовки находящиеся в нестационарном температурном поле [5, 100, 88, 123].

Необходимо отметить тот факт, что важно разделять различные виды нестационарности температурного поля, возникающие при термической обработке заготовки. К ним необходимо отнести: изменение температуры тела во времени (нестационарность во времени), изменение температуры по габаритам заготовки (нестационарность по толщине). Отдельно следует рассматривать нестационарность изменения теплофизических свойств материала заготовки в зависимости от температуры.

Исходя из вышеперечисленного, для определения остаточных напряжений

необходимо решить ряд задач (рис. 9) в указанной ниже последовательности.

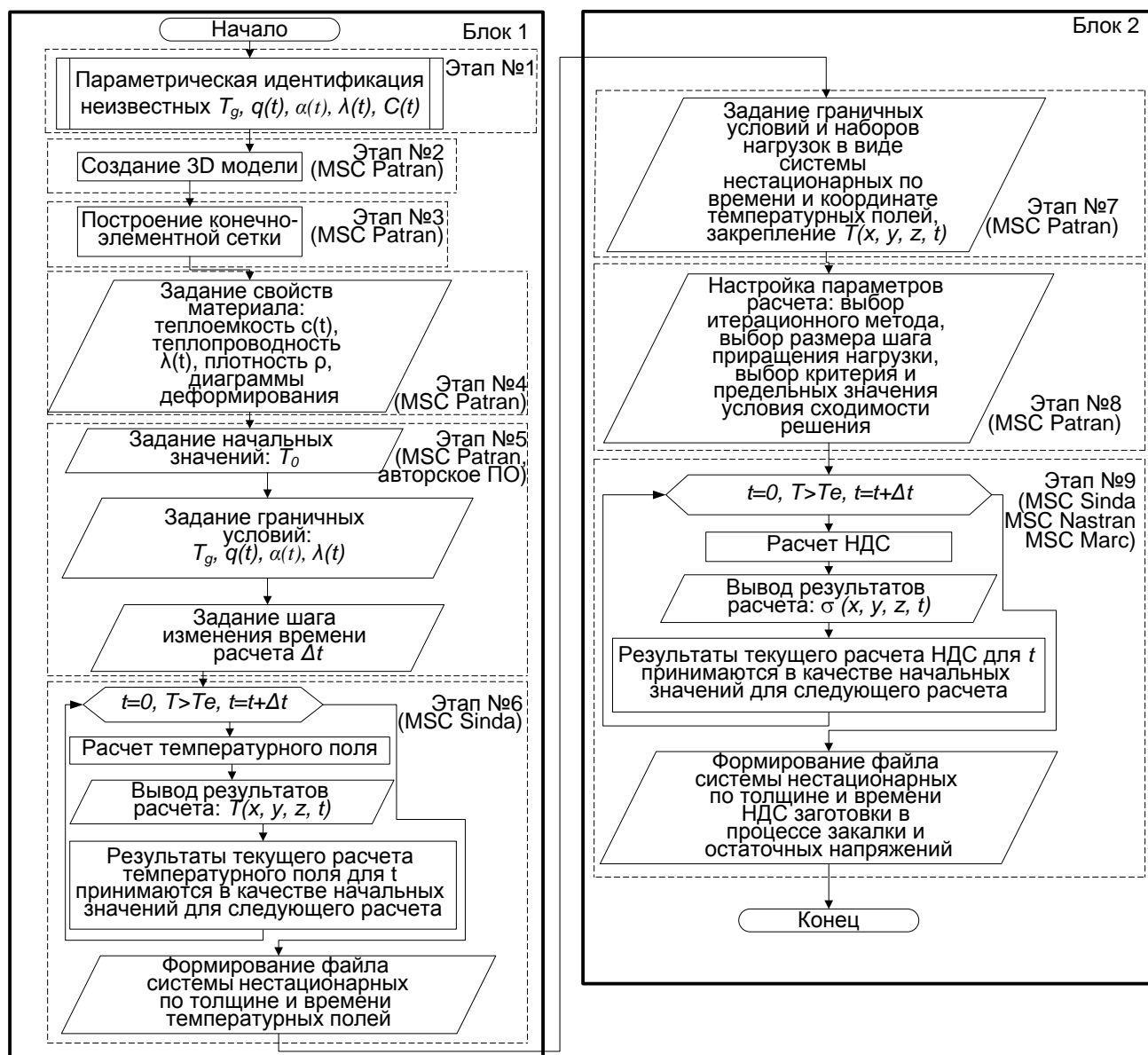


Рисунок 9 – Система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей

Особое внимание акцентировано на важных аспектах идентификации температурозависимых параметров процесса охлаждения (нагрева), таких как, определение коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$, механических свойств (диаграмм напряженно-деформированного состояния (НДС)) материала заготовки, теплофизических свойств (теплопроводности $\lambda(t)$, теплоемкость $c(t)$) в диапазоне

температур термообработки, параметров расчета.

В связи с этим, в работе предложен алгоритм параметрической идентификации температурозависимых параметров, характеризующих нестационарный теплообмен заготовки в процессе термообработки (рис. 10).

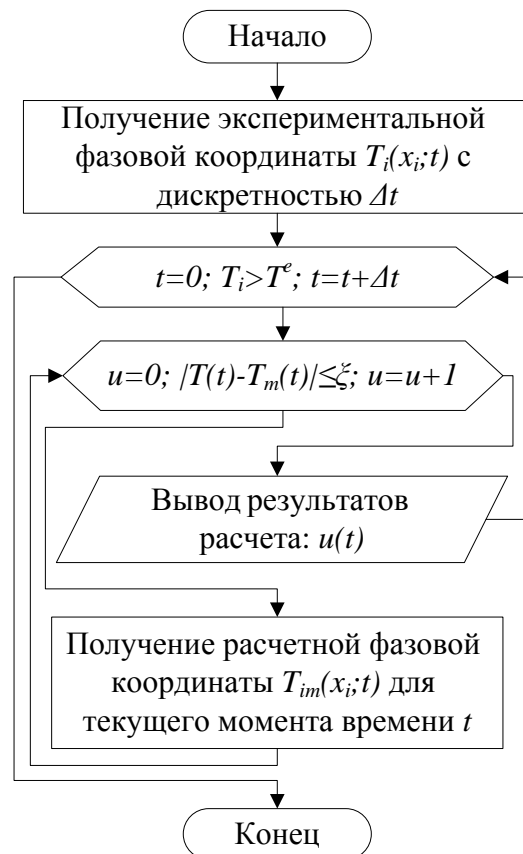


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма параметрической идентификации температурозависимых параметров

В соответствии с предлагаемым алгоритмом:

1. Определяются экспериментальные кривые охлаждения
2. Полученные экспериментальные зависимости разбиваются на ряд временных интервалов с шагом Δt , в пределах которых температура изменяется по линейному закону, а идентифицируемый параметр – постоянный.
3. Определяются расчетные кривые охлаждения, разбитые на такие же временные интервалы, как и экспериментальные кривые охлаждения.

4. По экспериментальным кривым охлаждения с интервалом дискретизации Δt оцениваются значения параметра, обеспечивающего минимум величины квадратичного функционала невязки между расчетными и фактическими данными (1).

$$J = \sum_{j=1}^N e_j^2 \rightarrow \min \quad (17)$$

где, $e_j = T_i - T_{mi}$ - невязка, определённая как разность между выходом исследуемого объекта и реакцией, вычисленной по математической модели объекта.

Принимая во внимание дискретность экспериментальных значений, полученных при наблюдении за системой, можно считать $J \rightarrow \min$, если на каждом шаге $\Delta t e_j \rightarrow \min$. Учитывая наличие погрешности измерений экспериментальных значений ξ , определяемая условиями эксперимента и точностью измерительных систем, возможно ограничить величину невязки величиной $k\xi$, где $k \in (0;1)$.

2.2. Математическое моделирование системы нестационарных температурных полей заготовок

В соответствии с [101, 102, 108] математическая модель изменения температурного поля при термической обработке может быть записана, как:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T) = 0 \quad (18)$$

где ρ - плотность, c - удельная теплоемкость, λ - коэффициент теплопроводности, $Q_w(x, y, z, t, T)$ - мощность внутренних источников тепловыделения.

Граничные условия математической модели при термообработке соответствуют условиям третьего рода [60].

$$\begin{aligned}
t = 0: \quad T = T_0, 0 \leq x \leq L \\
x = 0: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha_1(T - T^{e1}) \quad t > 0, \alpha_1 > 0 \\
x = L: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2(T - T^{e2}) \quad t > 0, \alpha_2 > 0
\end{aligned}
\tag{19}$$

где λ – коэффициент теплопроводности, T^{e1} и T^{e2} – температура внешней среды, T_0 – начальная температура заготовки, α_1 и α_2 – коэффициент теплоотдачи.

В этом случае, существует потенциальная возможность учесть различные условия конвективного теплообмена среда-заготовка, которые оказывают влияние на процесс теплоотдачи, изменение температуры среды в процессе обработки, шероховатость поверхности, толщина окисленного слоя и т.д. при помощи введения температурных зависимостей $\alpha(t)$, $\lambda(t)$, $c(t)$. Однако, при моделировании можно использовать ряд обоснованных допущений. Так температуру среды можно принять постоянной величиной, подразумевая обеспечение непрерывной конвекции жидкости при закалке в проточную воду либо охлаждение в большом объеме воды. Считаем возможным пренебречь длительностью погружения образца в закалочную среду, учитывая тот факт, что время погружения (при скорости погружения v , заготовка длиной L , L/v) значительно меньше времени обработки.

Учитывая, что нахождение аналитического решения даже для несложных задач не всегда возможно, будем использовать численные методы. Расчет теплового поля численными методами с высокой точностью производят ряд программных комплексов, к которым можно отнести MSC Nastran, MSC Marc, MSC Sinda и др. Хотя все вышеперечисленные программные продукты производят расчет с достаточной точностью, они в большинстве своем обладают следующим недостатком: отсутствие возможности использования в расчетах нестационарного коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$. В MSC Sinda данный недостаток отсутствует. Программное обеспечение позволяет производить

тепловой расчет с учетом нелинейной зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности тела $\alpha(t)$, так как MSC Sinda специализированный программный комплекс для решения задач теплового анализа. Данный комплекс производит сложные тепловые расчеты с использованием метода конечных разностей. Результаты теплового анализа, полученные в MSC Sinda можно использовать для задания тепловых нагрузок в программных комплексах MSC Nastran и MSC Marc для расчета сложного напряженно-деформированного состояния.

Блок-схема расчета (рис. 10) системы нестационарных по толщине и времени температурных полей с заданным временным интервалом на всем диапазоне температур закалки состоит из ряда основных этапов.

Первый этап заключается в построении геометрической модели исследуемого тела. Второй этап посвящен построению конечно-элементной сетки – один из наиболее важных этапов конечно-элементного анализа обеспечивающий получение адекватных результатов расчета. Необходимо помнить, что точность расчета методом конечных элементов во многом зависит от правильного выбора типа и размеров конечных элементов. В [120] без привязки к определенным конфигурациям исследуемых изделий приведен ряд общих рекомендаций, требующих детализации в каждом конкретном случае, в том числе:

- линейные элементы требуют более мелкой сетки, чем элементы более высокого порядка (с промежуточными узлами);
- упорядоченная сетка предпочтительнее произвольной;
- прямоугольная сетка с четырьмя узлами более выгодна, чем сетка с треугольными элементами;
- сетка треугольных элементов с промежуточными узлами имеет точность, близкую к сетке прямоугольных элементов с четырьмя узлами;

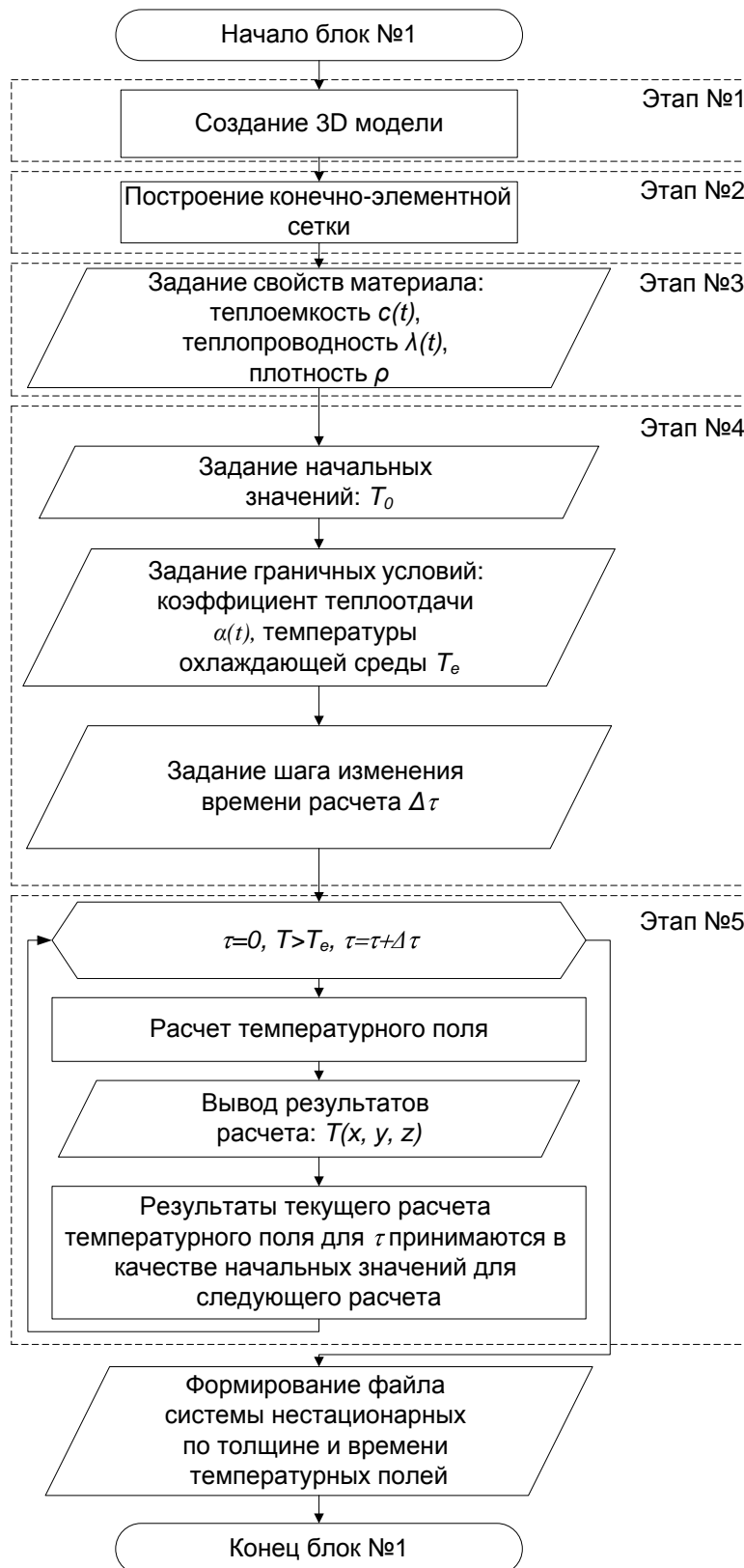


Рисунок 10 – Блок-схема расчета нестационарных тепловых полей

– прямоугольная сетка с восемью узлами предпочтительнее сетке треугольных элементов с промежуточными узлами, несмотря на большую площадь прямоугольных элементов;

– аппроксимация смещений кубическим полиномом (элемент третьего порядка) не требует мелкой сетки.

Мелкая сетка требуется там, где ожидается большой градиент деформаций или напряжений (отверстие, выточка, трещина и т. п.). В то же время крупная сетка может применяться в зонах, с мало изменяющимися относительными деформациями или напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса для расчетчика. В связи с этим перед созданием конечно-элементной сетки необходимо выделить предполагаемые области концентрации напряжений.

Заметим, что точность результатов расчетов уменьшается, если существенно различаются размеры соседних элементов вблизи концентратора напряжений.

С точки зрения конечно-элементного анализа можно смело говорить о том, что оптимальным является разбиение на элементы имеющие форму простейших равносторонних фигур (равносторонний треугольник, квадрат, равносторонний тетраэдр, куб) [87].

Практически это требование достигается очень редко и получаемое разбиение на конечные элементы отлично от оптимального. Поэтому возникает задача оценки качества полученного сеточного разбиения, для чего строятся различные измерители (таблица 1).

Для четырехугольных элементов следует ограничить их стремление к «игольчатой форме», для чего используется такой измеритель, как вытянутость. Используются и другие измерители, данные о которых приведены в таблице 1, где также указаны рекомендуемые и оптимальные значения соответствующих мер качества.

Учитывая вышеприведенные рекомендации, рекомендации службы поддержки MSC Software призматическую форму заготовок подвергаемых термической обработке, отсутствие криволинейных линий геометрической модели, проведение теплового и структурного анализа заготовки принимаем решение использовать элемент типа Hex. Порядок конечного элемента принимаем Hex 8, учитывая прямолинейные границы конечных элементов модели.

Таблица 1

Измерители качества сеточного разбиения

Параметр	Треугольники		Четырехугольники	
	Оптимум	Рекомендуется	Оптимум	Рекомендуется
Коэффициент формы		1...1,3		1...4
Минимальный угол, градусы	60	30...60	90	45...90
Максимальный угол, градусы	60	60...90	90	90...135
Отношение максимального угла к минимальному	1		1	
Отношение максимальной стороны к минимальной	1	1...4	1	1...4
Отношение площади к квадрату периметра	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	0,5...2	0,0625	0,04...0,1
Вытянутость	-	-	1	0,25...1

Одним из таких измерителей является коэффициент формы, который

вычисляется следующим образом. Для каждой стороны элемента L , определяется площадь идеального элемента такой величины (для равностороннего треугольника она равна $0,433$, а для квадрата —), и затем эти площади усредняются.

Отношение этой осредненной «идеализированной» площади к реальной площади элемента принимается в качестве меры качества.

Принимая во внимание, что размер элемента напрямую влияет на точность и продолжительность расчета, выбор размера проведем в следующей последовательности:

- в первую очередь определим количество элементов по толщине заготовки h , учитывая, что в случае заготовки, типа плита, толщина является наименьшим размером. Для заготовки с размерами 390 240 38 были проведены исследования влияния количества элементов по наименьшему габаритному размеру на точность вычисления. В соответствии с результатами, представленными на рисунке 11, рассчитанные значения температур не изменяются при увеличении количества элементов по толщине более 6. Принимая во внимание простоту геометрической модели и регулярность построения конечно-элементной сетки, прежде всего на точность расчета влияет количество разбиений, а не абсолютные размеры элемента. Учитывая вышесказанное, принимаем минимальное количество элементов по толщине равное 6.

- необходимо определить максимальные габариты элемента по двум оставшимся координатам. В (таблице 1) указаны рекомендации по наибольшему соотношению сторон элемента (отношение максимальной стороны к минимальной не должно превышать 4). С учетом данных рекомендаций максимальные габариты конечного элемента $h/6$ $4h/6$ $4h/6$. Принимая во внимание, что отношение толщины реальных деталей, подвергаемых термической обработке к любому оставшемуся габаритному размеру значительно больше 4-х, вышеуказанные габариты конечных элементов не будут отрицательно

сказываться на точности вычислений. Минимальные габариты соответствуют размеру $h/6 \times h/6 \times h/6$. Расчет температуры поверхности заготовки с размерами 390 240 38 мм при вышеуказанных максимальных габаритах конечных элементов показывает отклонение в расчетах от 0,001 до 0,01 %, что подтверждает ранее высказанное предположение. При этом, время вычислений при максимальных габаритах составляет 13 минут, при минимальных 1 час 11 минут, что позволяет говорить о целесообразности использования приведенных рекомендаций. В частных случаях при соотношении длина/толщина, ширина/толщина заготовки менее 4-х целесообразно принимать соответствующий габаритный размер конечного элемента минимальным.

Третий этап посвящен заданию свойств материала. Так как реальный технологический процесс закалки заготовок из алюминиевых сплавов происходит в диапазоне температур от 475 °С до 15°С [43, 72]. Следовательно, в этом же диапазоне температур необходимо задавать изменение теплофизических свойств материала от температуры.

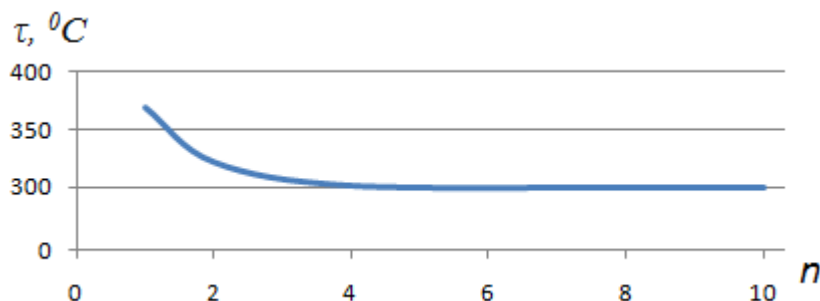


Рисунок 11 – Зависимость расчетных значений температуры τ на поверхности заготовки (сплав В95, 390х240х30 мм) от количества элементов n по толщине

Пренебрежение вышеуказанными температурными зависимостями приводит к значительным погрешностям расчета (рис. 12). Кривые 1 и 2 характеризуют изменение температуры на поверхности заготовки, с изменяющимися от температуры и постоянными свойствами соответственно. Кривые 3 и 4 характеризуют изменение температуры в центре заготовки, с

изменяющимися от температуры и постоянными свойствами соответственно.

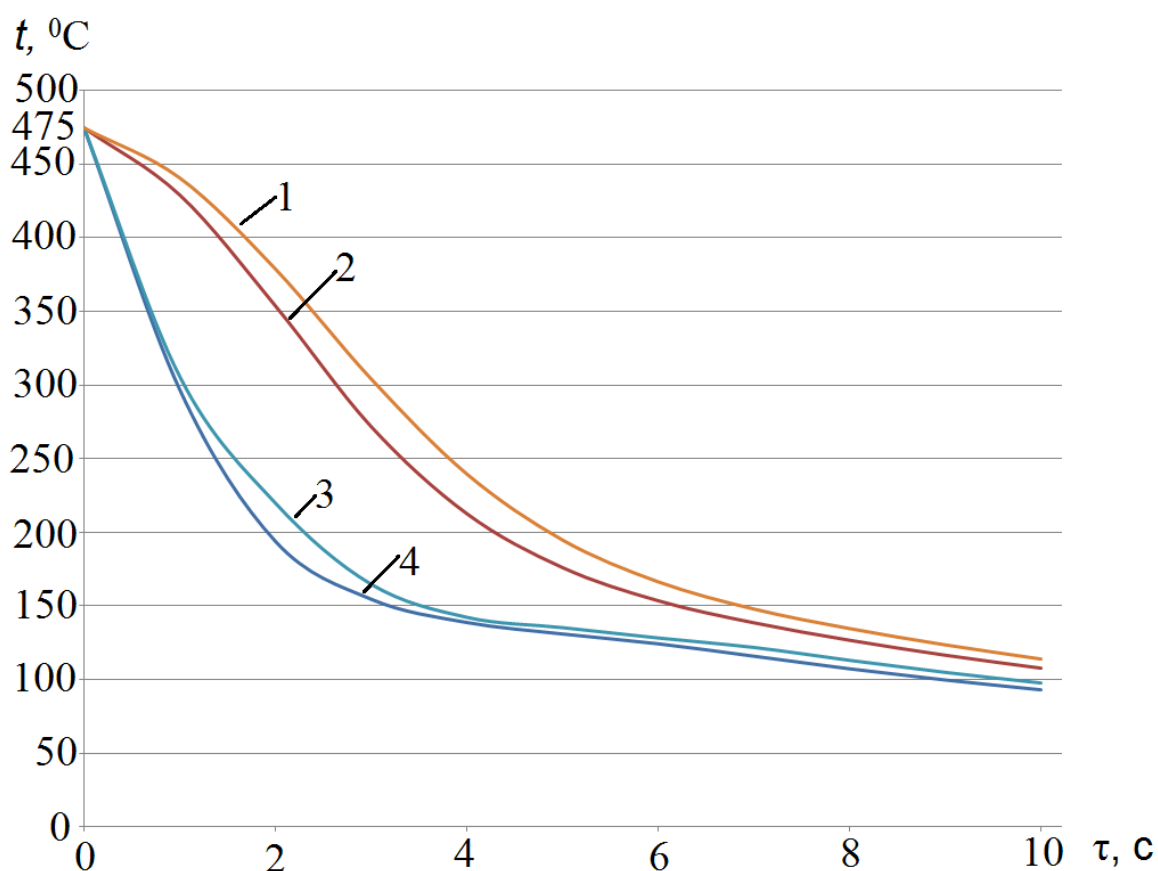


Рисунок 12 – Расчетные кривые при закалке в воду заготовок (сплав В95, 390x240x30 мм) полученные с постоянными и зависимыми от температуры теплофизическими свойствами, где 1 – кривая охлаждения поверхности заготовки рассчитанная с температурозависимыми свойствами, 2 – кривая охлаждения поверхности заготовки рассчитанная с постоянными свойствами, 3 – кривая охлаждения центра заготовки рассчитанная с температурозависимыми свойствами, 4 – кривая охлаждения центра заготовки рассчитанная с постоянными свойствами

Отклонение кривых охлаждения полученных с учетом изменения свойств и без учета изменяется в пределах от 2,59% до 11,9 % на поверхности заготовки и от 2,67% до 11,33% в центре заготовки (рис. 13). Отклонения расчетных значений, превышающие 10 %, свидетельствуют о недопустимости пренебрежения этим фактором.

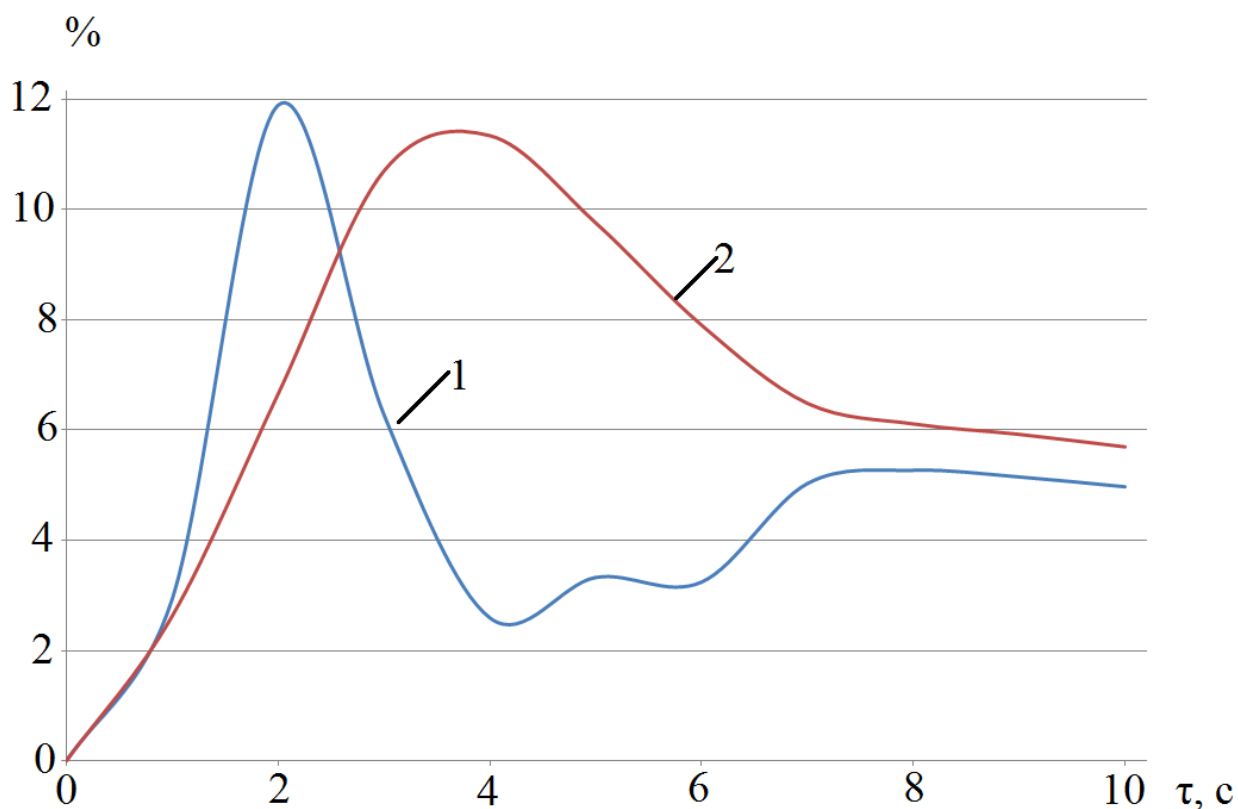


Рисунок 13 – Отклонение кривых охлаждения рассчитанных с постоянными и переменными свойствами, где 1 – отклонение в % по температуре на поверхности заготовки, 2 – отклонение в % по температуре в центре заготовки

На четвертом этапе расчета необходимо задать начальную температуру тела , температуру охлаждающей среды , температурозависимый коэффициент теплоотдачи $\alpha(t)$, время расчета τ , шаг по времени расчета $\Delta\tau$. Важно отметить, что начальная температура тела приложена ко всем конечным элементам модели, а так как конвекция является поверхностным эффектом, поэтому прилагается только к внешним поверхностям модели (рис. 14). Приращение шага по времени $\Delta\tau$ определяем опытным путем, постепенно уменьшая его значения, до тех пор пока не начнут изменяться значения полученных остаточных напряжений с отклонением менее 5%.

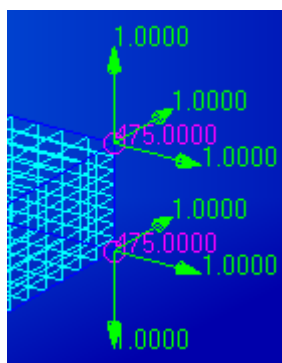


Рисунок 14 – Иллюстрация начальных и граничных условий

2.3 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния термически обработанной заготовки

Согласно [126, 17] формирование деформаций (20) и напряжений (21) может быть описано следующим образом:

$$\varepsilon_T(t) = \alpha(T(t)) \cdot (T(t) - T_{ref}) - \alpha(T_0) \cdot (T_0 - T_{ref}) \quad (20)$$

где $\varepsilon_T(t)$ – температурные деформации; $T(t)$ – температура тела, $^{\circ}\text{C}$; T_{ref} – референтная (эталонная) температура, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – начальная температура, $^{\circ}\text{C}$; $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения, $1/^{\circ}\text{C}$.

$$\sigma = -E \cdot \varepsilon_T \quad (21)$$

где σ – температурные напряжения, Па; ε_T – температурные деформации; E – модуль упругости, Па.

Принимая во внимание, что технологическая система является многофакторной, температурные деформации, вызывающие неравномерные температурные напряжения, зависят от распределения нестационарного по телу и времени температурного поля, нелинейно изменяющихся механических характеристик материала заготовки в зависимости от изменения температуры и деформации, расчет напряженно-деформированного состояния будем выполнять численными методами. Широкое распространение для решения прикладных задач получил метод конечных элементов [108, 120, 87, 77]. Для определения напряженно-деформированного состояния широко используют программный

комплекс MSC Nastran с применением пре- постпроцессора MSC Patran. MSC Nastran – одна из лучших конечно-элементных систем в мире, поэтому за рубежом проект рассчитанный в данной программе не вызывает сомнений в его надежности. MSC Nastran имеет специальную опцию, MSC Nastran SOL 600 – по сути «встроенный» решатель Marc, обеспечивающий проведение углубленного анализа существенного нелинейного поведения конструкций и решения задач теплопередачи, включая связанные теплопрочностные задачи [128]. Так же важно отметить, что данное программное обеспечение имеет возможность использовать результаты теплового расчета, полученные в программном комплексе MSC Sinda, для задания тепловых нагрузок. Поэтому, принимаем для расчета напряженно-деформированного состояния программный конечно-элементный комплекс MSC Nastran.

Блок-схема расчета системы напряженно-деформированных состояний (НДС) заготовки, возникающих в процессе термической обработки с заданным временным интервалом на всем диапазоне температур закалки, состоит из нескольких основных этапов (рис. 15).

На этапе №1 происходит построение геометрической модели исследуемого тела в соответствии с его габаритами. Этап №2 посвящен построению конечно-элементной сетки. Размер и тип элемента согласно приведенным рекомендациям принят $h/6$ $4h/6$ $4h/6$ hex 8. На этапе №3 задаем начальную температуру тела T_0 , начальные значения напряжений $\sigma_0(x, y, z)$, температуру тела в разные моменты времени процесса закалки с определенным шагом $T_i(x, y, z, \tau)$, величину которого мы определили при расчете нестационарного теплового поля, закрепление – ограничение по перемещениям, конечную температуру T_n . Учитывая, что остаточные напряжения, это напряжения, существующие без внешнего нагружения, начальная температура T_0 тела должна быть равна конечной температуре T_n . В процессе проведения термической обработки снимаются напряжения, имеющиеся в материале [65], образованные на предыдущих этапах

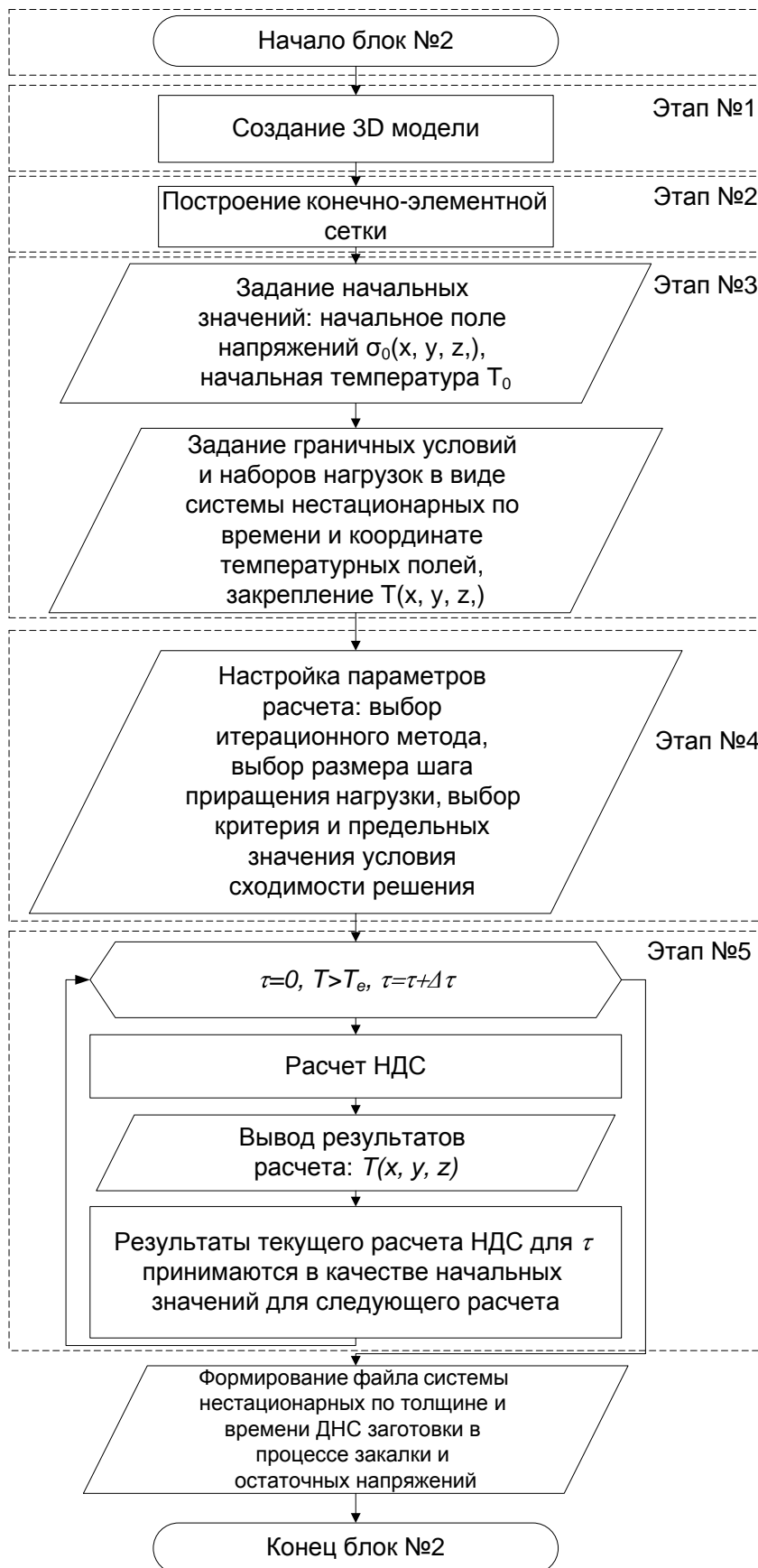


Рисунок 15 – Блок-схема №2

технологического процесса производства маложестких деталей, и формируются термические остаточные напряжения, поэтому начальные напряжения $\sigma_0(x, y, z)$ будут равны нулю. При проведении структурного типа анализа напряженно-деформированного состояния в программных комплексах обязательным условием является задание ограничений по перемещениям. Анализируя физику процесса закалки, неравномерное охлаждение формирует только температурные напряжения, никаких ограничений по перемещениям реальная модель не испытывает, но необходимо задать ограничение по перемещениям модели, иначе получаем сингулярность (неопределенность функции в точке) в задаче [127, 126, 94]. В качестве температурной нагрузки целесообразно использовать систему нестационарных по толщине и времени температурных полей с заданным шагом по времени, характеризующую изменение температуры исследуемого объекта на всем диапазоне температур закалки, рассчитанную в программном комплексе MSC Sinda в соответствии с блок-схемой №1 (рис. 10).

Четвертый этап заключается в подготовке необходимых параметров расчета. Учитывая нелинейность изменения граничных условий и механических свойств в процессе закалки, расчет напряженно-деформированного состояния заготовки, возникающего в процессе термической обработки, связан с определенными трудностями.

Для расчета подобных нелинейных задач на практике применяют итерационные методы. Поэтому на данном этапе необходимо определиться с выбором подходящего итерационного метода, обеспечивающего необходимую точность расчета при минимальной его длительности.

Так для решения задач в программном комплексе MSC Nastran применяются следующие итерационные методы: полный метод Ньютона-Рафсона, модифицированный метод Ньютона-Рафсона, метод секущих (хорд), метод корректировки энергии деформации [127].

Анализируя представленные методы, условия их применения, особенности

и отличия, относительную геометрическую простоту модели, отсутствие больших деформаций и перемещений, возникающих в процессе термической обработки, необходимую высокую точность расчетов, наиболее подходящим методом является полный метод Ньютона-Рафсона.

Следующий важный параметр, необходимый для получения приемлемых результатов, это определение размера шага приращения нагрузки. Выбор большого шага приращения нагрузки приводит к снижению точности полученного решения и отсутствию сходимости, с другой стороны использование малого шага приращения приводит к значительному увеличению длительности расчета. Программный комплекс MSC Nastran дает возможность выбора из двух режимов. Режим №1 устанавливает фиксированный размер шага. Режим №2 определяет размер шага автоматически, учитывая инерционность процессов, нелинейность изменения нагрузок, геометрии, свойств. Главным критерием при выборе размера шага является точность полученных результатов.

Согласно рекомендациям [127] предпочтительным будет являться выбор автоматического режима определения шага приращения нагрузки. Так же при расчете температурных напряжений и деформаций необходимо выбрать критерий сходимости по перемещениям, учитывая небольшие значения деформаций вызванных температурным расширением заготовки в процессе охлаждения.

Этап №5 посвящен расчету напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе закалки. Учитывая изменение нестационарного температурного поля с заданной дискретностью и его влияния на напряженно-деформированное состояние заготовки, необходимо результаты текущего расчета НДС для τ принимать в качестве начальных значений напряжений $\sigma_0(x, y, z)$ для следующего расчета при $\tau = \tau + \Delta \tau$. Подобный рекурсивный алгоритм позволяет описать повторяющееся вычисление напряженно-деформированного состояния в зависимости от продолжительности изменения нестационарного температурного поля и его шага приращения по времени.

Так как формирование остаточных напряжений связано с возникновением температурных напряжений, вызывающих неравномерные пластические деформации, для проведения расчетов используются зависимости механических свойств материала заготовки от температуры. Для расчета остаточных напряжений необходимы диаграммы напряжений-деформаций во всем диапазоне температур закалки. Литературный обзор показывает, что в справочной литературе в недостаточном объеме представлены данные по температурным зависимостям механических свойств алюминиевых сплавов. Поэтому в ходе выполнения работы поставлена задача по определению механических свойств (диаграмм напряжений-деформаций) в диапазоне температур закалки.

Представленная методика расчета остаточных напряжений, возникающих в процессе термической обработки нуждается в оценке адекватности, точности полученных результатов, поэтому в работе необходимо расчетные значения температуры тела и остаточных напряжений сравнить с экспериментальными и оценить отклонения.

Выводы

1. Разработан алгоритм идентификации температурозависимых параметров, характеризующих процесс нагрева (охлаждения), позволяющий решать обратную задачу теплопроводности широкого перечня условий протекания процессов, отличающийся универсальным подходом к определению неизвестных параметров математических моделей процесса термообработки.

2. Разработан алгоритм расчета системы нестационарных по толщине и во времени тепловых полей с заданным временным интервалом на всем диапазоне температур закалки, с соответствующими описаниями протекающих процессов, необходимыми рекомендациями, логикой принятия решения и последовательностью, отраженной в блок-схеме.

3. Разработан алгоритм проведения расчета напряженно-деформированного состояния заготовки, с описанием особенностей, настройки необходимых параметров расчета, начальных и граничных условий, рекурсии.

Глава 3. Определение коэффициента теплоотдачи

3.1. Математическая модель процесса нагрева (охлаждения) при закалке и ее программная реализация

Математическая модель процесса нагрева (охлаждения) в условиях закалки включает уравнение нестационарной теплопроводности Фурье-Кирхгофа, начальные, граничные условия III рода:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ где } 0 < x < L \\ \text{начальные условия: при } t = 0, 0 \leq x \leq L: T = T_0 \\ \text{граничные условия: при } x = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T^{e1}), \text{ где } t > 0, \alpha_1 > 0 \\ \text{при } x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T - T^{e2}), \text{ где } t > 0, \alpha_2 > 0 \end{array} \right. \quad (22)$$

где: ρ – плотность, c – теплоемкость, T – температура заготовки, x – координата по толщине заготовки, L – толщина заготовки, λ – коэффициент теплопроводности, T^{e1} и T^{e2} – температура внешней среды, T_0 – начальная температура заготовки, α_1 и α_2 – коэффициент теплоотдачи, T_i – температура в i сечении заготовки, t – время.

Экспериментальные кривые охлаждения $T_i = f_i(x_i, t)$, где $i = \overline{1, 2, 3, 4, 5}$, $t > 0$, характеризующие изменение температуры по толщине исследуемого тела в процессе термообработки, необходимы для параметрической идентификации температурозависимого коэффициента конвективной теплоотдачи, характеризующего процесс теплообмена между закалочной средой и заготовкой. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи, позволяющее получить экспериментальные кривые охлаждения представлено в пункте 2 главы III данной работы.

Так как нестационарное тепловое поле заготовки описывается уравнением дифференциальным уравнением, с нелинейно изменяющимися граничными

условиями, процесс обратного решения данной системы уравнений, относительно коэффициента теплоотдачи, представляется весьма трудной задачей. Поэтому определение коэффициента теплоотдачи осуществляется в соответствии с разработанной методикой параметрической идентификации с использованием метода конечных разностей. Видится целесообразным использование ЭВМ и соответствующего программного обеспечения. В ходе выполнения диссертационной работы была поставлена задача – разработать программно-алгоритмический комплекс определения коэффициента теплоотдачи по экспериментальным кривым охлаждения.

На рис. 16 представлен алгоритм необходимого программного обеспечения.

Представленный алгоритм работы программного комплекса состоит из трех основных этапов.

На этапе №1 необходимо ввести исходные данные. Так как тепловое поле заготовки в процессе охлаждения описывается уравнением Фурье-Кирхгофа с начальными и граничными условиями третьего рода и расчет дифференциальных уравнений производится методом конечных разностей, исходными данными для расчета являются: количество узлов в конечно-разностной сетке по толщине N , продолжительность процесса теплообмена $t_{\text{конечное}}$, удельная теплоемкость c , теплопроводность λ и плотность ρ материала заготовки, температура среды на левой T_l и правой границе T_n , начальная температура тела T_0 , шаг по толщине Δx и по времени Δt . Для обеспечения необходимой точности определения теплового поля заготовки, важно учитывать нелинейное изменение теплофизических свойств. Для этого программа рассчитывает значения теплофизических свойств, линейно интерполируя табличные значения, которые были введены на первом этапе программы.

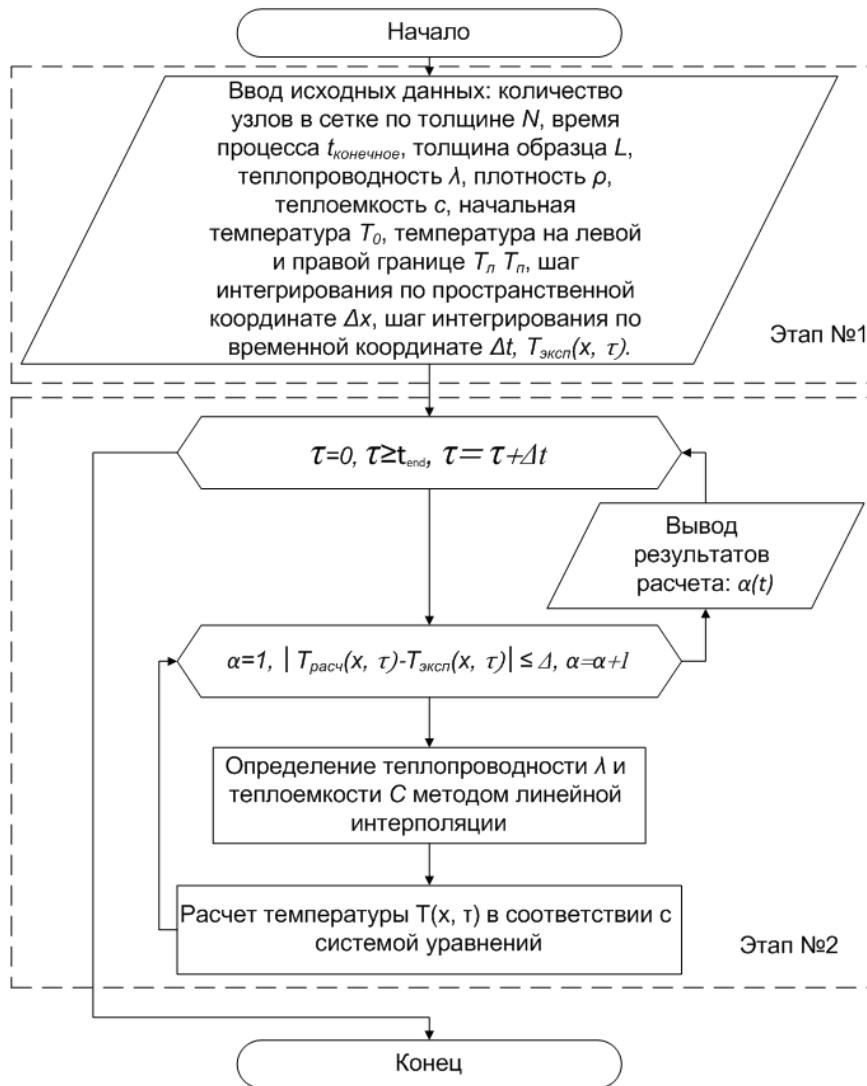


Рисунок 16 – Блок-схема программного комплекса для определения коэффициента теплоотдачи

На этапе №2 производится расчет температурного поля заготовки на основе исходных данных заданных на первом этапе в соответствии с разработанной расчетно-экспериментальной моделью (22).

Учитывая, что разработанная модель представляет собой уравнение Фурье-Кирхгофа, с начальными, граничными условиями и экспериментальными зависимостями, расчет производим численным методом, методом конечных разностей, заменяя вышеуказанное дифференциальное уравнение его конечно-разностными аналогами:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right), \quad i = 2, \dots, N-1, \quad n \geq 0 \quad (23)$$

Представленное выражение сводится к наиболее общему виду:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i \quad (24)$$

где $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}$, $B_i = \frac{2 \cdot \lambda}{h^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}$, $F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} \cdot T_i^n$.

Полученные уравнения являются трехточечными разностными уравнениями второго порядка, а система (21) имеет трехдиагональную структуру. При этом, существуют числа α_i и β_i ($i = 2, \dots, N-1$), при которых:

$$T_i^{n+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{n+1} + \beta_i \quad (25)$$

В этом случае, трехточечное уравнение второго порядка (24) преобразуется в двухточечное уравнение первого порядка (25). В результате уменьшения в выражении (25) индекса i на единицу:

$$T_{i-1}^{n+1} = \alpha_{i-1} \cdot T_i^{n+1} + \beta_{i-1} \quad (26)$$

и преобразования уравнения (24) в соответствии с полученным результатом, последнее выражение приобретает следующий вид:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot \alpha_{i-1} \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot \beta_{i-1} = F_i \quad (27)$$

или

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \cdot T_{i+1}^{n+1} \quad \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \quad (28)$$

Для определения α_i и β_i по (28) необходимо знать α_{i-1} и β_{i-1} , которые находятся из левого граничного условия.

Далее по формулам (25) последовательно находятся $\alpha_2, \beta_2, \dots, \alpha_{N-1}, \beta_{N-1}$, при условии, что α_1 найдено из правого граничного условия.

Таким образом, решение уравнений вида (24) производится методом прогонки, для успешности применения которого необходимо, чтобы в процессе вычислений не возникало ситуаций с делением на нуль, а при больших размерностях систем не должно быть быстрого роста погрешности округлений.

Результат проведения дискретизации граничных условий третьего рода с погрешностью $O(h)$ и определения первых прогоночных коэффициентов α_i и β_i из соотношения (28) представлен выражением (30):

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = k_1 (T_{e1} - T|_{x=0}) \Rightarrow -\lambda \frac{T_2 - T_1}{h} = k_1 (T^{e1} - T_1) \quad (29)$$

Вводим обозначение $\frac{k \cdot h}{\lambda} = B_i$, тогда

$$\begin{aligned}
T_1 - T_2 &= Bi_1 T^{e1} - Bi_1 T_1 \\
T_1 &= \frac{1}{1 + Bi_1} T_2 + \frac{1}{1 + Bi_1} T^{e1} \\
\left\{ \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{1 + Bi_1} = \frac{\lambda}{\lambda + hk_1} \\ \beta_1 &= \frac{1}{1 + Bi_1} T^{e1} = \frac{hk_1}{\lambda + hk_1} T^{e1} \end{aligned} \right.
\end{aligned} \tag{30}$$

А правое граничное условие используем для определения температуры . Итак,

$$\begin{aligned}
\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} &= k_2 (T^{e2} - T|_{x=L}) \\
\lambda \frac{T_N - T_{N-1}}{h} &= k_2 (T^{e2} - T_N) \\
T_N (1 + Bi_2) &= T_{N-1} + Bi_2 T^{e2} \\
T_{N-1} &= \alpha_{N-1} T_N + \beta_{N-1} \\
T_N (1 + Bi_2) &= \alpha_{N-1} T_N + \beta_{N-1} + Bi_2 T^{e2} \\
T_N &= \frac{\beta_{N-1} + Bi_2 T^{e2}}{1 + Bi_2 - \alpha_{N-1}} \\
T_N &= \frac{\lambda \cdot \beta_{N-1} + h \cdot k_2 \cdot T^{e2}}{h \cdot k_2 + \lambda (1 - \alpha_{N-1})}
\end{aligned} \tag{31}$$

Проводим дискретизацию граничных условий III рода с погрешностью $O(\dots)$. Предположим, что на границе выполняется уравнение теплопроводности (19). Далее по аналогии с аппроксимацией граничного условия II рода получаем:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}^{n+1} &= \frac{T_2^{n+1} - T_1^{n+1}}{h} - \frac{h}{2 \cdot a} \cdot \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\tau} = \frac{k_1}{\lambda} T_1^{n+1} - \frac{k_1}{\lambda} T^{e1} \\
T_1^{n+1} &= \alpha_1 \cdot T_2^{n+1} + \beta_1 \\
\left\{ \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{2 \cdot a \cdot \tau}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_1)}; \\ \beta_1 &= \frac{h^2}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_1)} T_1^n + \frac{2 \cdot a \cdot \tau \cdot Bi_1 \cdot T^{e1}}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_1)} \end{aligned} \right. \\
\left\{ \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{2 \cdot a \cdot \tau \cdot \lambda}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\lambda + h \cdot k_1)}; \\ \beta_1 &= \frac{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot h \cdot k_1 \cdot T^{e1}}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\lambda + h \cdot k_1)} \end{aligned} \right.
\end{aligned} \tag{32}$$

Использование же правого граничного условия дает следующее соотношение:

$$\begin{aligned}
 T_N^{n+1} &= \frac{h^2 \cdot T_N^n + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\beta_{N-1} + Bi_2 \cdot T^{e2})}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_2 - \alpha_{N-1})} = \\
 &= \frac{\lambda \cdot h^2 \cdot T_N^n + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\lambda \cdot \beta_{N-1} + h \cdot k_2 \cdot T^{e2})}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (h \cdot k_2 + \lambda \cdot (1 - \alpha_{N-1}))}
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Программное обеспечение дает возможность при сравнении экспериментальных и расчетных значений изменять степень точности соответствия данных, для определения коэффициента с большей точностью. Однако при повышении степени соответствия экспериментальных и расчетных значений увеличивается и время определения коэффициента теплоотдачи. Так при соответствии экспериментальных и расчетных данных с точностью до 1 °С, время обработки составляет 15,23 секунды, с точностью до 0,1 °С, время счета увеличивается до 48,56 секунды. Учитывая, что экспериментальные кривые охлаждения, при использовании предложенного способа и устройства получены с точностью до 3,75 °С, определение коэффициента при сравнении данных с точностью менее 1 °С не видится целесообразным. Экспериментальные кривые охлаждения были получены с частотой 10 Гц, поэтому линейные участки на кривых охлаждения постоянны в течении 0,1 секунды, что обеспечивает нелинейное изменение коэффициента теплоотдачи с частотой 10 Гц.

Программный комплекс для определения коэффициента теплоотдачи написан с использованием языка высокого уровня С++. Интерфейс программы (рисунок 17) имеет ряд функциональных окон: начальные условия, теплофизические свойства, ход работ, кривые охлаждения или нагрева, определение коэффициента теплоотдачи, вывод графиков.

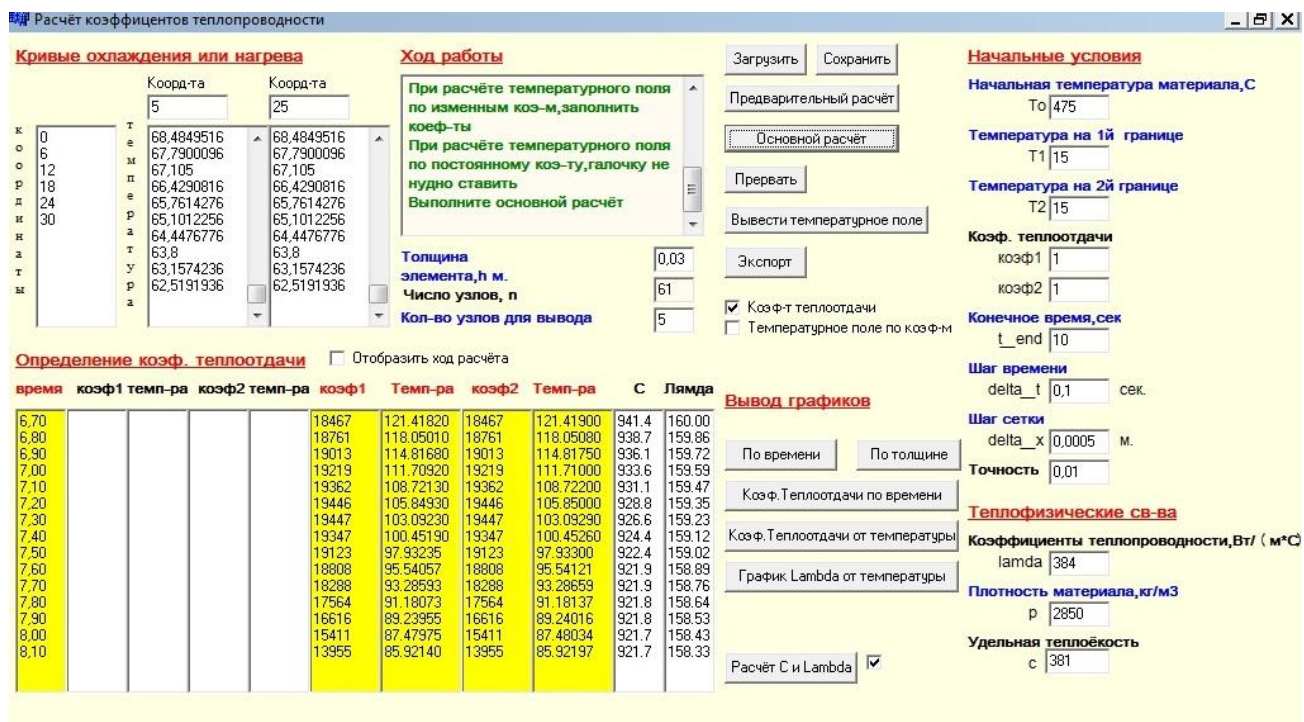


Рисунок 17 – Интерфейс программного комплекса для определения коэффициента теплоотдачи

Окно №1 – начальные условия предназначено для выполнения этапа №1 – ввода исходных данных (начальная температура T_0 температура на 1-ой (правой) границе T_1 , температура на 2-ой (правой) границе T_2 , коэффициент теплоотдачи α , конечное время расчета t_{end} , шаг времени Δt , шаг сетки Δx , точность). Коэффициент теплоотдачи α задается в метрической системе $Вт/м^2К$, по умолчанию равен $1 \text{ Вт/м}^2К$. Конечное время t_{end} – временной участок, в пределах которого необходимо произвести расчет. Шаг времени Δt – временной интервал, в пределах которого необходимо производить вывод результатов расчета. Шаг сетки Δx – интервал по толщине, в пределах которого необходимо производить вывод результатов расчета. Точность – величина определяющая соответствие расчетных и экспериментальных значений температуры $T(x, \tau)$.

Окно №2 – теплофизические свойства (удельная теплоемкость c [Вт/кг К], теплопроводность λ [Вт/м К]) необходимые для расчета теплового поля.

Окно №3 – ход работы, предназначено для отображения хода работы и

подсказок для пользователя программы.

Окно №4 – определение коэффициента теплоотдачи, предназначено для отображения расчета температуры $T(x, \tau)$ и определения коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$.

Окно №5 – вывод графиков, позволяет отображать в графическом виде зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры $\alpha(t)$ и времени $\alpha(\tau)$, теплопроводности от температуры $\lambda(t)$.

Для управления программой предназначены кнопки: «предварительный расчет», «основной расчет», «вывести температурное поле», «экспорт», «расчет теплоемкости c и теплопроводности λ ».

Кнопка «предварительный расчет» необходима для подготовки расчетов, выполняет расчет количества узлов и заполнения массива значениями начальной температурой, после заполнения необходимых значений. После нажатия кнопки «основной расчет» производится расчет температурного поля по исходным данным и определение коэффициента теплоотдачи методом последовательного приближения. Кнопка «вывести температурное поле» позволяет получить в табличном виде значения температуры тела (рис. 18).

Кнопка «экспорт» необходима для получения файла, содержащего табличные значения температурозависимого коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ с расширением *.csv (текстовый формат, предназначенный для представления табличных данных, с разделительным символом – запятой). Данный файл необходим для импорта значений коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ в программный комплекс MSC Sinda для расчета системы нестационарных тепловых полей. Кнопки «расчет теплоемкости c и теплопроводности λ » необходимы для линейной интерполяции табличных данных температурозависимых теплофизических свойств (рис. 19).

MM	0,0	6,0	12,0	18,0	24,0	30,0
t=0,00 сек:	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000
t=0,30 сек:	48,7949	49,5625	49,8304	49,9044	49,8688	49,6688
t=0,60 сек:	48,1908	49,1130	49,5643	49,7279	49,6992	49,4688
t=0,90 сек:	47,7299	48,7076	49,2645	49,5040	49,5043	49,2588
t=1,20 сек:	47,3351	48,3383	48,9576	49,2545	49,2876	49,0088
t=1,50 сек:	46,9782	47,9946	48,6528	48,9916	49,0534	48,8088
t=1,80 сек:	46,6455	47,6689	48,3524	48,7213	48,8060	48,6088
t=2,10 сек:	46,3295	47,3563	48,0565	48,4468	48,5490	48,3688
t=2,40 сек:	46,0252	47,0533	47,7646	48,1701	48,2852	48,1288
t=2,70 сек:	45,7297	46,7576	47,4761	47,8922	48,0169	47,8688
t=3,00 сек:	45,4407	46,4674	47,1904	47,6139	47,7457	47,5988
t=3,30 сек:	45,1567	46,1816	46,9071	47,3357	47,4726	47,3288
t=3,60 сек:	44,8767	45,8992	46,6259	47,0579	47,1985	47,0588
t=3,90 сек:	44,5998	45,6196	46,3465	46,7806	46,9241	46,7788
t=4,20 сек:	44,3255	45,3424	46,0688	46,5042	46,6497	46,5088
t=4,50 сек:	44,0534	45,0672	45,7927	46,2287	46,3758	46,2388
t=4,80 сек:	43,7833	44,7939	45,5180	45,9541	46,1024	45,9688
t=5,10 сек:	43,5149	44,5222	45,2447	45,6806	45,8299	45,6888

Рисунок 18 – Вывод температурного поля в табличном виде

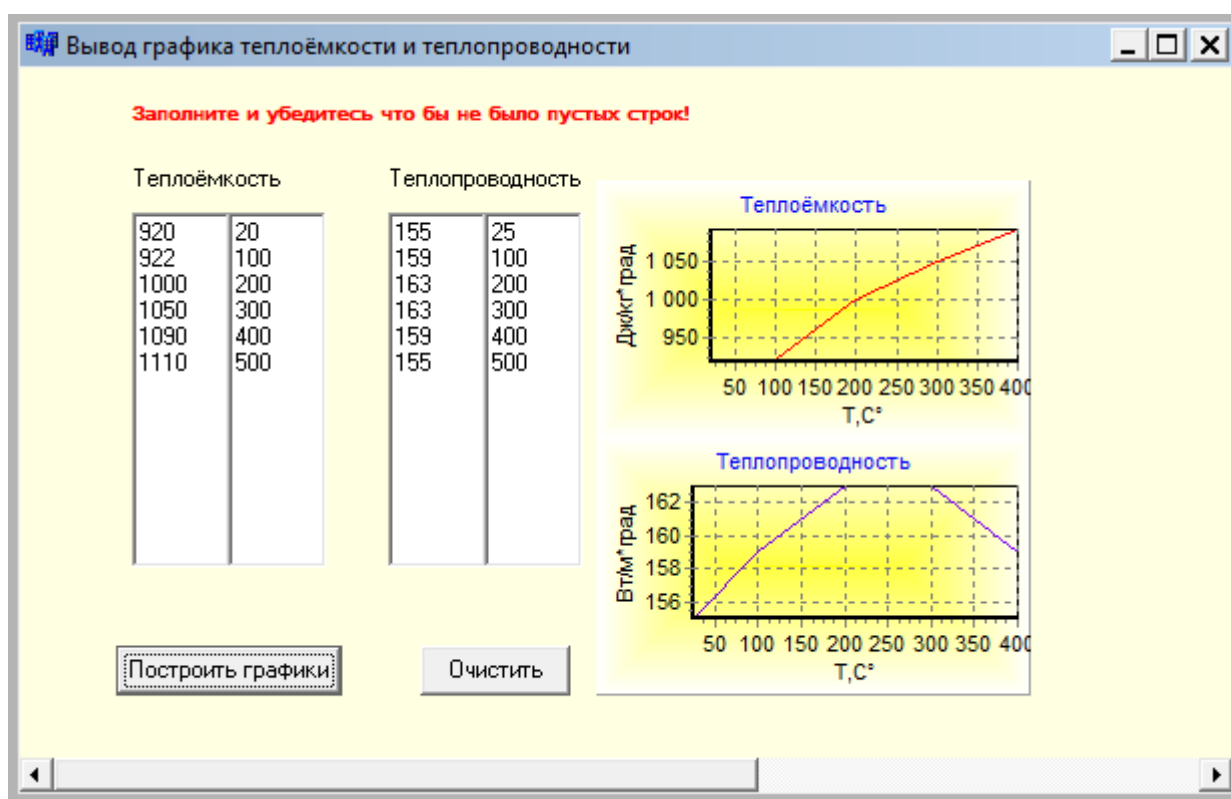


Рисунок 19 – Линейная интерполяция табличных значений теплофизических свойств

Последовательность действий при работе с программным обеспечением для

определения коэффициента теплоотдачи представлена на рис. 20. На первом этапе работы с программным обеспечением необходимо ввести исходные данные для расчета: толщина заготовки x , количество узлов для вывода данных N , начальная температура T_0 , температура на левой границе T_1 и правой границе T_2 , предварительное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$, шаг по времени $\Delta\tau$, шаг по толщине Δx , теплоемкость $c(t)$, теплопроводность $\lambda(t)$, экспериментальные кривые охлаждения $T(x, \tau)$.

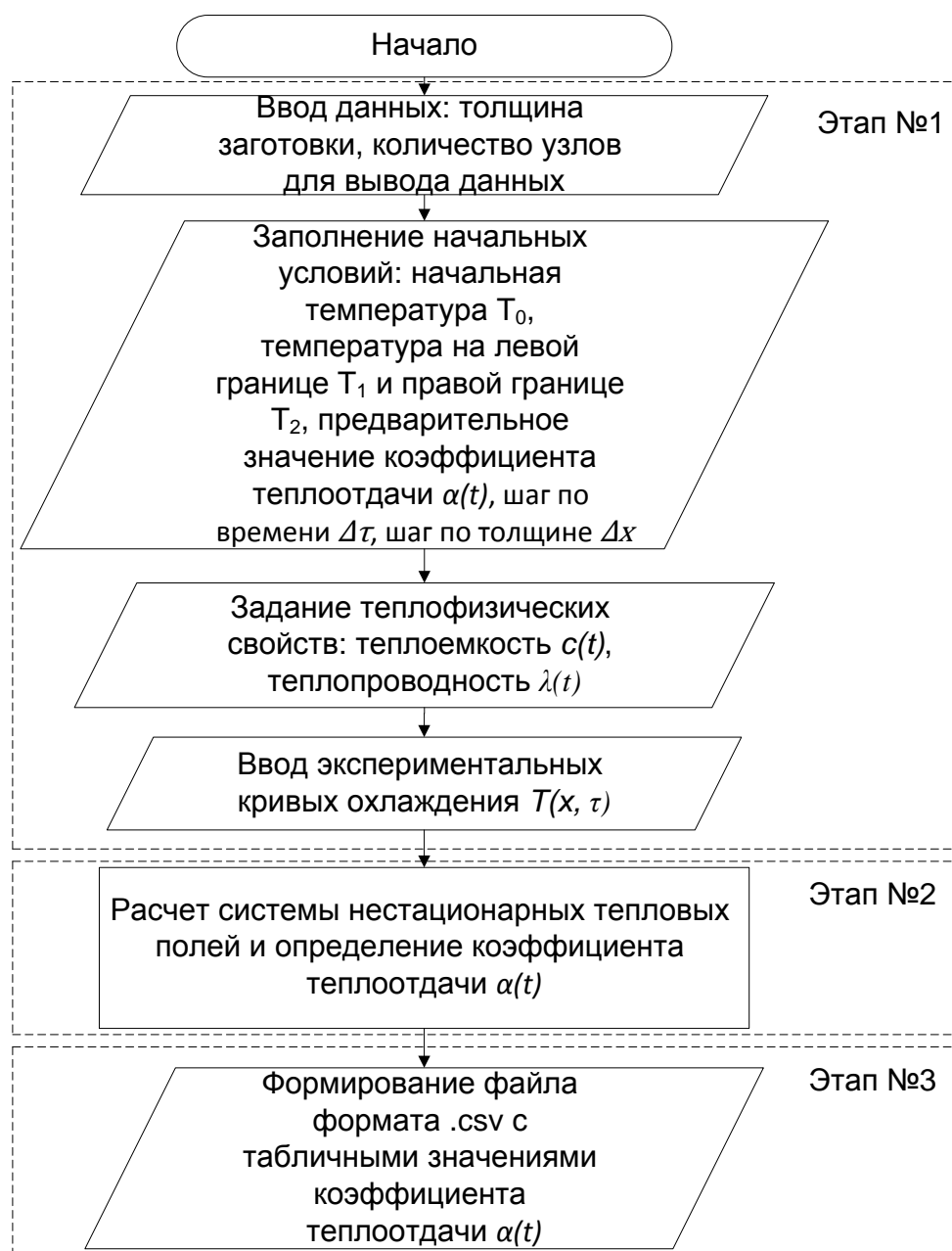


Рисунок 20 – Блок-схема работы с программным обеспечением

На втором этапе производится линейная интерполяция табличных значений теплоемкости $c(t)$ и теплопроводности $\lambda(t)$, расчет системы нестационарных температурных полей и определение методом последовательного приближения коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$. На третьем этапе производится вывод в табличном виде температурного поля (рис. 18) и коэффициента теплоотдачи в формате файла *.csv.

Определение коэффициента теплоотдачи по экспериментальным кривым охлаждения $T(x, \tau)$ методом последовательного приближения с использованием программного обеспечения произвели для заготовки толщиной 30 мм из алюминиевого сплава В95, при охлаждении заготовки в закалочной среде с температурой 15 °С. Полученные значения коэффициента теплоотдачи представлены в виде графика на рис. 21.

Анализируя представленную зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности охлаждаемого тела можно выделить четыре основных этапа изменения коэффициента теплоотдачи

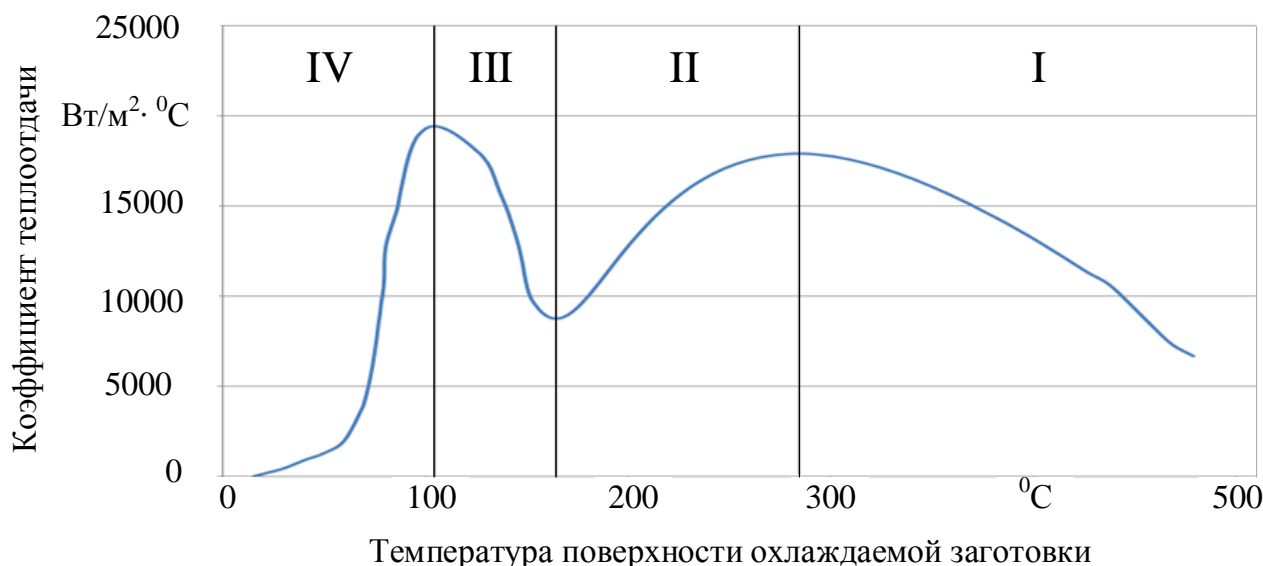


Рисунок 21 – Расчетный коэффициент теплоотдачи, характеризующий конвективный теплообмен между заготовкой из алюминиевого сплава (толщиной $x=30$ мм, сплав В95) и пресной водой (температура 15 °С)

Анализируя представленную зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности охлаждаемого тела можно выделить четыре основных этапа изменения коэффициента теплоотдачи. На первом этапе происходит погружение заготовки в закалочную среду, коэффициент теплоотдачи увеличивается при вынужденной конвекции. Так плотная паровая рубашка, образованная большой разницей температур между охлаждаемым телом и закалочной средой, сбивается при погружении заготовки в объем жидкости. На втором этапе, когда опускание заготовки в охлаждающую среду прекращается, устанавливается режим пленочного кипения, так как градиент температур ΔT возникающий между телом и охлаждающей средой превышает второй кризис кипения Δt_{cr2} [137], который характеризуется снижением коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$, за счет образования плотного парового слоя, который изолирует горячую поверхность заготовки от закалочной жидкости. На третьем этапе градиент температур ΔT достигает значений первого кризиса кипения Δt_{cr1} и происходит переход от пленочного режима кипения жидкости к пузырьковому. Переход от пленочного режима кипения к пузырьковому характеризуется повышением значений коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ до максимальных значений и увеличением интенсивности охлаждения, несмотря на снижение градиента температур. На четвертом этапе, температура тела опускается ниже температуры кипения закалочной жидкости, происходит теплообмен посредством свободной конвекции, который характеризуется низкими значениями коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$.

Для подтверждения адекватности полученного температурозависимого коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ в программном комплексе MSC Sinda, который является промышленным стандартом в области сложных тепловых расчетов [129], были рассчитаны кривые охлаждения на глубине 3,75 мм, 5 мм, 7,5 мм, 10 мм, 15 мм, с использованием полученных значений коэффициента, для дальнейшего

сравнения с экспериментальными кривыми, полученными на соответствующих расстояниях от поверхности охлаждаемого тела. Отклонение значений экспериментальных и расчетных кривых охлаждения не превышают 1% (рис. 22).

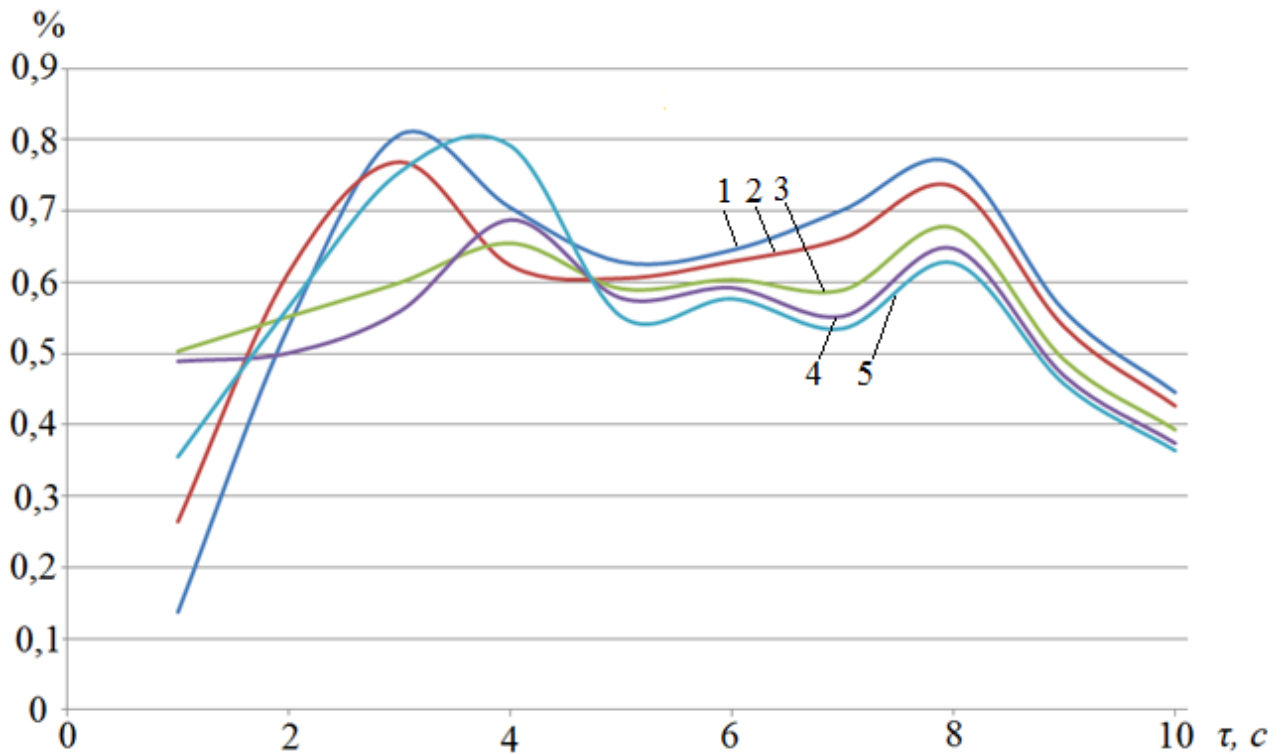


Рисунок 22 – Отклонения в % расчетных и экспериментальных кривых охлаждения заготовки (габариты 390x240x30 мм, сплав В95), где 1- на глубине 15 мм, 2 – 10 мм, 3 – 7,5 мм, 4 – 5 мм, 5 – 3,75 мм.

Интересно отметить, что наибольшие отклонения расчетных кривых охлаждения от кривых охлаждения полученных при проведении эксперимента наблюдаются в моменты смены режимов кипения жидкости и соответственно значительных изменений коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$.

3.2. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи

Существует ряд работ, целью которых является определение коэффициента теплоотдачи [82, 86, 79, 81, 80], но вопрос о точности и надежности полученных

значений коэффициента теплоотдачи остается актуальным. Представленные способы и устройства определения коэффициента теплоотдачи носят частный характер и малоприменимы к определению коэффициента теплоотдачи, характеризующего процесс теплообмена при термообработке. Так же существуют работы, направленные на определение охлаждающей способности закалочных сред. Эти способы оценки охлаждающей способности закалочных сред [83, 125, 84], определяют коэффициент теплоотдачи вне зависимости от размеров и формы охлаждаемого тела. В качестве эталонного образца в основном эти способы используют серебряный шарик, в центре которого размещена термопара. Эталонный образец нагревают до требуемой температуры и охлаждают, а при помощи термопары фиксируют изменение температуры в центре шарика в процессе охлаждения. По полученным кривым охлаждения производят расчет коэффициента теплоотдачи. Учитывая, высокую теплопроводность серебра, из которого сделан образец и небольшой диаметр, температуру по сечению принимают одинаковой.

Процесс охлаждения серебряного шарика и призматических заготовок из алюминиевых сплавов будут характеризовать разные значения коэффициента теплоотдачи, поэтому результаты, полученные с использованием эталонного образца в качестве серебряного шарика, не совсем точно будут описывать процессы охлаждения, протекающие при закалке алюминиевых сплавов. Для оценки охлаждающей способности сред с высокой скоростью охлаждения, так же используются термозонды разной формы и размеров [82, 84] из меди, серебра, никелевых сплавов и т.д.

Способы и датчики определения коэффициента теплоотдачи, представлены в достаточно большом количестве работ, в основном они подходят только для конкретных частных случаев либо сложны в изготовлении и применении. Исходя из анализа представленных работ, поставлена задача разработки устройства и способа определения коэффициента теплоотдачи при закалке призматических

заготовок из алюминиевых сплавов для расчета нестационарного температурного поля заготовки в процессе закалки.

Анализируя представленные работы, наиболее подходящим является устройство определения коэффициента теплоотдачи [80]. Представленное устройство выполнено в виде Архимедова цилиндра, у которого высота равна диаметру. В образце закреплены две термопары, одна из которых измеряет среднюю температуру по поверхности, а вторая среднюю по объему изделия. На основании полученных кривых охлаждения рассчитывают коэффициент теплоотдачи. Процесс охлаждения изделий при закалке характеризуется коэффициентом теплоотдачи, нелинейно изменяющимся в зависимости от многих факторов, основным из которых является смена режимов кипения жидкости от пленочного к пузырьковому, зависящая от разности температур изделия и закалочной среды. Смену режимов кипения жидкости принято называть вторым кризисом кипения. Температура второго кризиса кипения жидкости зависит от формы охлаждаемого изделия. В некоторых точках поверхности тела (границы, выступы) охлаждение происходит быстрее, что приводит к смене режима кипения, зависящего от температуры. Поэтому процессы охлаждения и коэффициенты теплоотдачи архимедова цилиндра и призматического образца будут отличаться. Так же важно отметить, что изменение коэффициента теплоотдачи влияет на изменение кривых охлаждения по толщине образца и наоборот. Поэтому для повышения точности определения коэффициента теплоотдачи по кривым охлаждения, видится целесообразным определение кривых охлаждения по толщине образца в разных его сечениях.

Анализируя представленные отличительные признаки можно сделать вывод, что значения коэффициента теплоотдачи, полученные при использовании представленного устройства, представляющего архимедов цилиндр, с расположенными термопарами на двух изотермических поверхностях, будут отличаться от значений коэффициента теплоотдачи полученных при

использовании призматического образца с термопарами, характеризующими распределение температуры по толщине.

Цель создания устройства – повышение точности определения коэффициента теплоотдачи при закалке призматических образцов, с учетом нелинейного изменения температурного поля.

Решение предлагаемой задачи достигается тем, что определение коэффициента теплоотдачи осуществляется при помощи устройства (рис. 23). Устройство состоит из опытного образца, термоэлектрических преобразователей (термопар), усилителя сигнала, устройства автоматизации измерений, электронно-вычислительной машины.

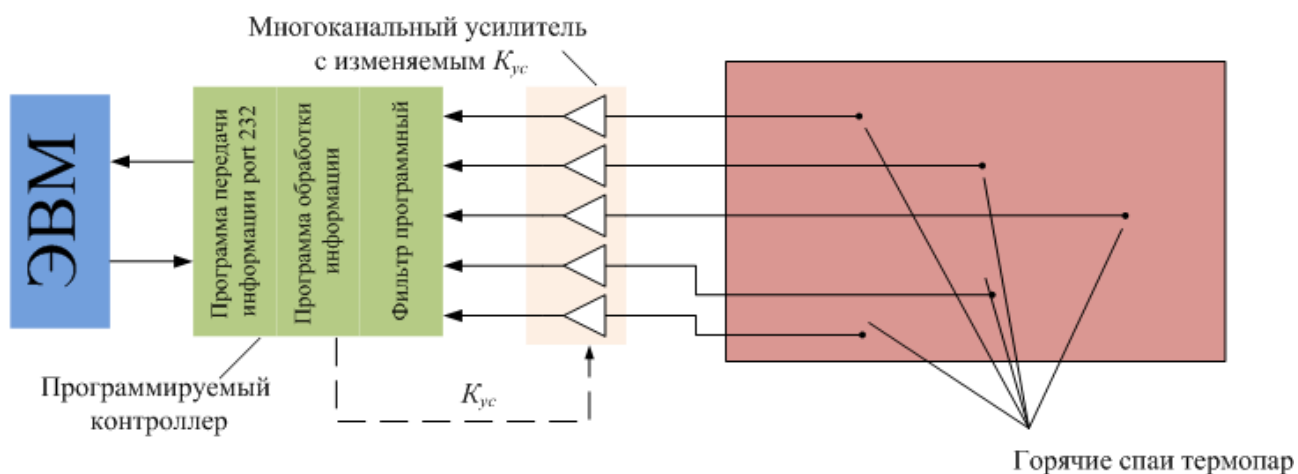


Рисунок 23 – Блок-схема устройства для определения коэффициента теплоотдачи

Опытный образец представляет собой призматическую заготовку (рис. 24) из высокопрочного алюминиевого сплава В95 с расположенными внутри на разном расстоянии от поверхности по толщине термоэлектрическими преобразователями.

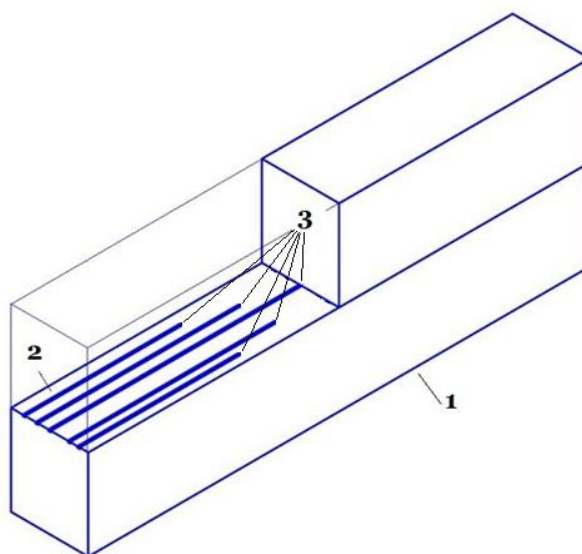


Рисунок 24 – Опытный образец с термопарами 1, разрезанный вдоль на две части и имеющий пазы размерами 1*1 мм для установки термопар – 2 по толщине образца, пазы расположены вдоль образца. Горячие спаи термопар приварены контактной сваркой в местах – 3 и расположены таким образом, что не оказывают влияние на перемещение изотермы по толщине образца.

Учитывая, что алюминиевые сплавы, используемые для производства маложестких деталей, имеют значения теплофизических свойств (теплопроводность λ , удельная теплоемкость c) отличающиеся незначительно, разница не превышает 5%, выбор сплава не принципиален, так как тепловые поля заготовок из разных сплавов будут одинаковыми. В устройстве были использованы термопары ТХА (К) хромель-алюмелевые с точность измерения температуры $\pm 2,5$ °С в диапазоне от -40 °С до 333 °С включительно и $\pm 0,0075*|t|$ свыше 333 °С до 1200 °С включительно [28]. Учитывая, что температура нагрева под закалку для алюминиевых сплавов может достигать 500 °С, максимальное отклонение составит 3,75 °С. Так как граничные условия на левой и правой границе охлаждаемого тела одинаковые, изменение температуры по толщине осуществляется так же симметрично относительно оси симметрии поперечного сечения заготовки. Учитывая симметричное изменение температуры, для получения данных ее изменения в большем количестве точек расположенных на

разном расстоянии от поверхности тела, термопары необходимо располагать асимметрично по толщине. Для исключения влияния термопар друг на друга и препятствия распространению тепловой волны по толщине образца, термопары необходимо располагать асимметрично по длине, на расстоянии, превышающем расстояние между термопарами по толщине. На концах термопар возникает термо-ЭДС, соответствующая значениям температуры на противоположных концах термоэлектрических преобразователей.

Для регистрации термо-ЭДС разработано устройство автоматизации проведения исследования, на основе использования Arduino Uno. Arduino Uno – устройство на основе микроконтроллера ATmega328. Имеет 6 аналоговых входов, максимальная частота опроса которых достигает 200 кГц. Аналоговые входы регистрируют изменение термо-ЭДС на концах термопары с точностью до 20 мВ. Для устройства Arduino Uno была написана программа [приложение 1], которая фиксирует значения термо-ЭДС на аналоговых входах и передает их на ЭВМ.

Учитывая, что значения термо-ЭДС в диапазоне измеряемых температур будут колебаться от 0 до 20 мВ [31], для повышения уровня информационного сигнала необходимо использовать усилитель. При выборе усилителя для термопар необходимо учитывать определенную специфику. Термопары имеют малый коэффициент преобразования, для термопар типа К он равняется $40,28 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ [31], соответственно, при температурах закалки до 500°C , сигнал вырабатываемый термопарой будет очень мал. При усилении такого сигнала, возникает проблема, связанная с большими синфазными помехами промышленной частоты и радионаводками. Усилитель должен хорошо подавлять 50-герцовый сигнал и иметь стабильное дифференциальное усиление. Его входное сопротивление должно быть достаточно высоким (более 10 кОм) [99]. Согласно [99], в качестве операционного усилителя лучше всего применить прецизионный шоррег-усилитель с крайне малым смещением (менее 10 мкВ) и столь же ничтожным температурным дрейфом (менее $100 \text{ нВ}/^\circ\text{C}$). К таким

усилителям можно отнести AD8551 Analog Devices, учитывая перечисленные преимущества, позволяющие произвести измерение температуры с высокой точностью, было принято решение использовать представленный операционный усилитель. Схема усилителя представлена на рисунке 25.

Процесс определения коэффициента теплоотдачи при помощи предложенного устройства, состоит из двух последовательных этапов: 1) нагрев (охлаждение) эталона в диапазоне температур, в пределах которого необходимо определение коэффициента теплоотдачи, и регистрация кривых охлаждения (нагревания) по толщине изменяющихся во времени 2) расчет коэффициента теплоотдачи по полученным кривым охлаждения.

Этап по регистрации кривых охлаждения (нагревания) осуществляется путём погружения эталона в охлаждающую (нагревающую) среду. В результате изменения температурного поля образца, термопары, асимметрично закрепленные на разном расстоянии от поверхности, фиксируют изменение температуры и формируют кривые охлаждения (нагревания) изменяющиеся во времени. После проведения этого этапа, полученные кривые охлаждения (нагревания) делятся на участки, где каждая кривая изменяется по линейному закону, и определяется значение коэффициента теплоотдачи на данном участке и всего образца в целом.

Таким образом, способ определения значений температурнозависимого коэффициента теплоотдачи можно представить в виде блок-схемы (рис. 26).

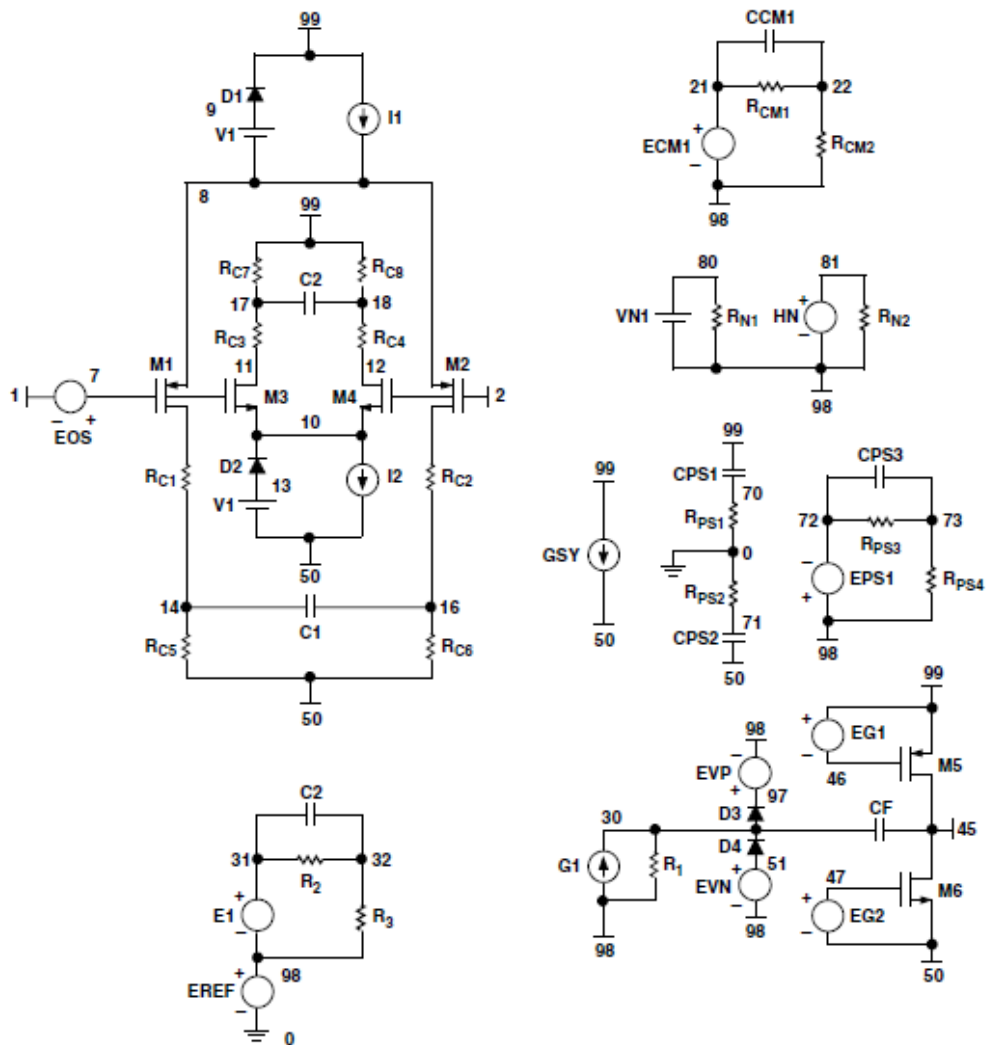


Рисунок 25 – Схема усилителя AD 8551 Analog Devices

При помощи представленного устройства были получены кривые охлаждения, характеризующие изменение температуры по толщине с частотой 10 Гц при температуре закалки 475 °С и охлаждающей жидкости 15°С. При организации и проведении эксперимента, для получения адекватных результатов, необходимо установить необходимое количество испытаний для отбора полученных данных в группу [108]. Учитывая отсутствие каких-либо предварительных данных, показатель точности устройства установили $k \approx 0,6$, показатель вероятности $t=1,96; P=0,95$

—.

Для получения достоверных данных по результатам расчета при

допустимой неточности 95%, учитывая принятые показатели точности k , показатель вероятности t , необходимо провести 11 серий экспериментов.

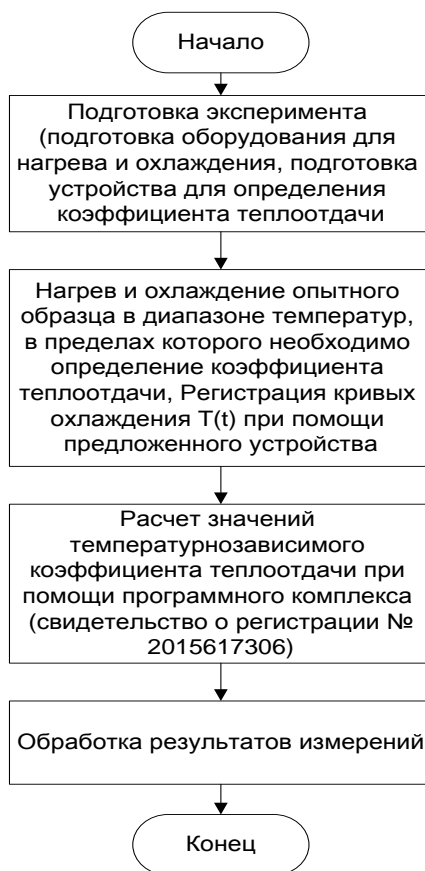


Рисунок 26 – Способ определения значений температурно-зависимого коэффициента теплоотдачи

Обработка результатов экспериментальных исследований по определению кривых охлаждения позволила получить усредненные кривые охлаждения (рис. 27), принятые для дальнейших расчетов.

Опираясь на данные динамики охлаждения заготовки можно выделить три основные зоны. Согласно [137] зона 1 соответствует процессу опускания заготовки в закалочную среду, вследствие чего происходит активный теплообмен, обусловленный большим градиентом температур и вынужденной конвекцией. Участок №2 соответствует пленочному режиму кипения жидкости, когда паровая пленка изолирует горячую стенку от жидкости. Интенсивное парообразование на поверхности охлаждаемого изделия объясняется большой разницей температур Δt

между охлаждающей средой и поверхностью тела T .

Зона 3 соответствует режиму развитого пузырькового кипения, где несмотря на снижения градиента температур Δt между телом и закалочной средой скорость охлаждения увеличивается.

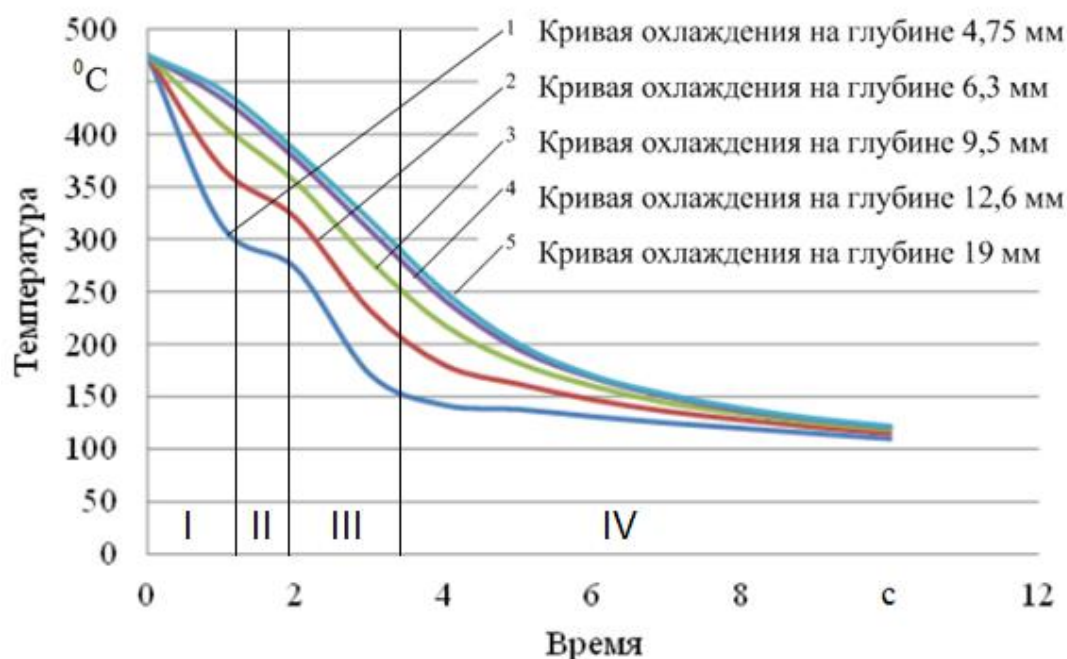


Рисунок 27 – Усредненные кривые охлаждения, полученные при выборке из 11 экспериментов с использованием предложенного устройства определения коэффициента теплоотдачи, где 1 – кривая охлаждения, характеризующая изменение температуры на глубине 15 мм, 2 – 10 мм, 3 – 7,5 мм, 4 – 5 мм, 5 – 3,75 мм.

Интенсификация теплообмена обусловлена пульсационным движением жидкости у стенки, вынуждаемым быстрорастущими пузырьками пара. Зона 4 соответствует режиму, при котором наблюдается свободная конвекция при малых значениях градиента температур Δt , коэффициента теплоотдачи и скорости охлаждения $V_{\text{охл}}$.

Выводы

1. Разработана математическая модель изменения нестационарного теплового поля заготовки в процессе проведения закалки, с учетом температурно-зависимых теплофизических свойств материала.

2. Разработано устройство определения коэффициента конвективной теплоотдачи, характеризующего процесс термической обработки, которое позволяет учитывать нелинейное изменение кривых охлаждения (нагрева), необходимое для повышения точности определения коэффициента теплоотдачи, при быстропротекающих процессах с изменением режимов кипения охлаждающей жидкости.

3. При помощи разработанного устройства, способа и соответствующего программного обеспечения экспериментально определены и проанализированы значения температурозависимого коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ характеризующего процесс охлаждения заготовки, и позволяющие рассчитать нестационарное тепловое поле заготовки.

Глава 4. Апробация системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений

4.1 Экспериментальное определение диаграмм напряжений-деформаций

Диаграммы напряжений-деформаций в диапазоне температур получают при проведении испытаний на растяжение. Методы испытаний на растяжение [27] при повышенных температурах [30] для металлов и сплавов на их основе регламентированы в стандартах. В соответствии с [29] образцы для определения механических свойств вырезаются из середины плиты по толщине в направлении поперек прокатки. Образцы изготавливались на металлорежущем станке 1К62, режущий инструмент и режимы резания были выбраны в соответствии с рекомендациями по обработке алюминиевых сплавов, таким образом, что бы исключить возможность изменения свойств металла при нагреве или наклепе. Так как применение коротких образцов предпочтительнее [27], в испытании применяем короткие образцы.



Рисунок 28 – Короткие образцы для испытаний на растяжение

Испытания на растяжение проводились на базе научно-исследовательской

лаборатории «Испытания строительных материалов и конструкций» НИ ИрГТУ, на испытательной машине Instron 5982 (рис. 29), с применением высокотемпературной камеры. Машина Instron 5982 производит испытания на растяжение-сжатие с максимальным усилием 100 кН. Управление испытанием производится компьютером со специализированным программным обеспечением Bluehill 3. Погрешность измерения нагрузок составляет . Для проведения испытаний при повышенных температурах используется термобароклав ТВV-3 (), с рабочей температурой до °С.



Рисунок 29 – Испытательная машина Instron 5982, с термобароклавом ТВV-3 при проведении испытаний на растяжение

Для проведения вышеуказанных экспериментальных исследований использовался высокопрочный алюминиевый сплав В95, широко применяемый в авиационной промышленности для производства маложестких деталей.



Рисунок 30 – Испытания при повышенных температурах с термобароклавом ТВВ-3

Результаты испытаний показали, что алюминиевый сплав В95 при растяжении в диапазоне температур от 20 до 475 °С имеет следующие диаграммы напряжений-деформаций (рис. 31).

Анализируя представленные зависимости напряжений от деформаций при разных температурах, можно заметить, что с повышением температуры снижается модуль упругости E , предел текучести материала σ_m , предел прочности σ_{np} и увеличивается относительное удлинение ε . Такое изменение свойств характерно для большинства металлов и сплавов. Однако интересно заметить, что при

температуре 300 °С относительное удлинение показало снижение, это можно объяснить полной растворимостью цинка в алюминии (рис. 32), который увеличивает прочность, но снижает пластичность, в алюминии при температурах свыше 250 °С [41]. При дальнейшем повышении температуры сохраняется закономерность увеличения относительного удлинения ε .

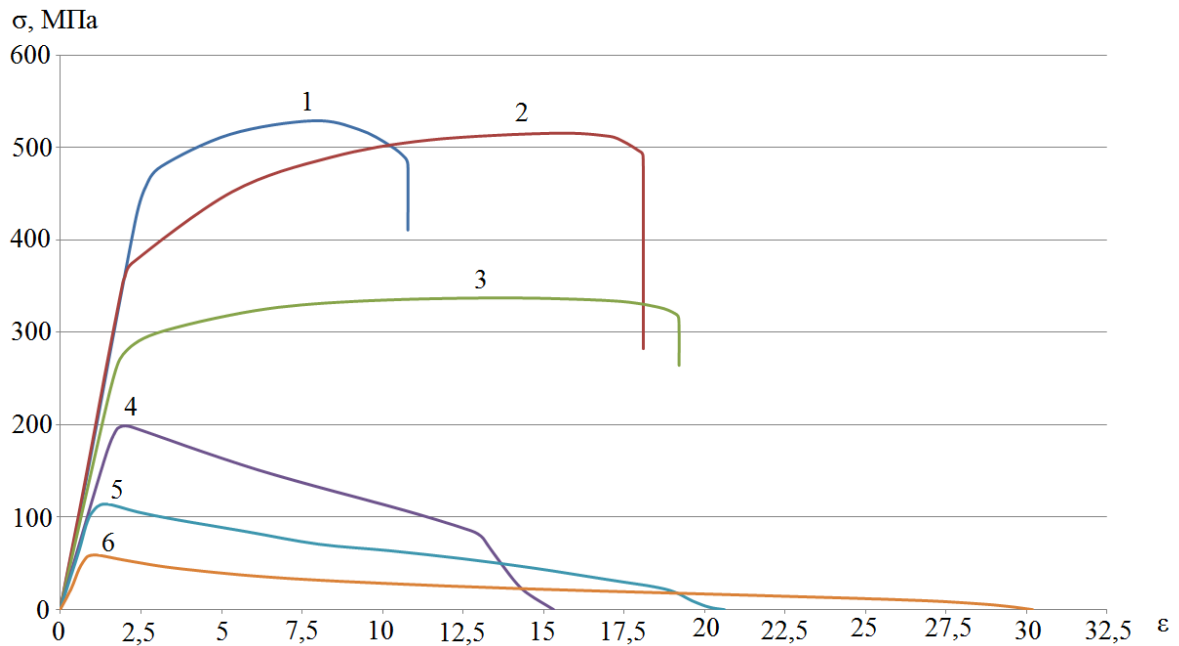


Рисунок 31 – Диаграммы напряжений деформаций сплава В95 в диапазоне температур от 20 до 475 °С, где 1 – при температуре образца $T=20$ °С, 2 – при $T=100$ °С, 3 – при $T=200$ °С, 4 – при $T=300$ °С, 5 – при $T=400$ °С, 6 – при $T=475$ °С

4.2 Расчет системы нестационарных тепловых полей и остаточных напряжений при производстве заготовок

Учитывая значения остаточных напряжений [65] на поверхности заготовок, полученных при экспериментальном определении экспресс-методом, предложенным А.И. Промптовым, Ю.И. Замашиковым и С.К. Каргапольцевым [37, 39], в заготовках с габаритами _____ мм из сплава В95, термически обработанных согласно [43, 72], расчет термических остаточных напряжений

распределенных по телу заготовки будем производить для заготовок соответствующего размера и материала.

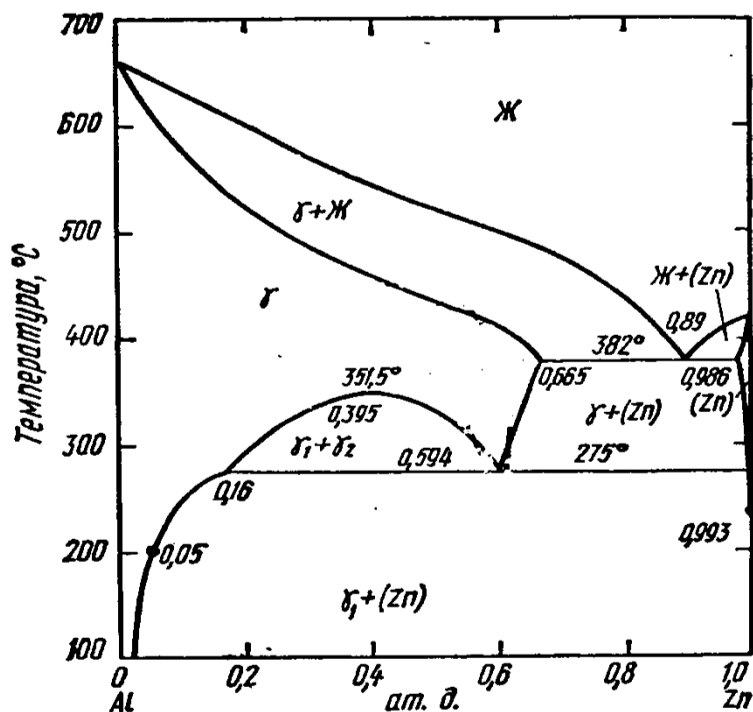


Рисунок 32 – Диаграмма состояния Al – Zn

Согласно вышеуказанной методике, на первом этапе необходимо создать геометрическую модель. Учитывая разные значения остаточных напряжений на поверхности в заготовках с габаритами из сплава В95 в разных плоскостях: $\sigma_{n,x}^o = 114 \text{ МПа}$ $\sigma_{n,z}^o = 80 \text{ МПа}$ в расчетах будем использовать трехмерную геометрическую модель. Размер элемента, исходя из размеров заготовки, согласно вышеприведенным рекомендациям принят с габаритами мм, тип элемента Hex 8. Размер элементов, учитывая отсутствие концентраторов напряжений, принимается постоянным.

Расчет системы тепловых полей производили в программном комплексе MSC Sinda, учитывая возможность экспорта тепловых полей в программный комплекс MSC Nastran в качестве нагрузок и граничных условий для расчета НДС заготовки, формируемого в процессе закалки, а также наличие лицензии на

использование данного продукта.

При расчете системы нестационарных по толщине и во времени тепловых полей в качестве начальных условий принимаем начальную температуру T_0 , равную температуре нагрева под закалку, так как в процессе разогрева заготовок до температуры закалки не происходит возникновения остаточных напряжений вследствие низкой скорости повышения температуры. Согласно [43; 72] закалка для высокопрочного алюминиевого сплава В95 производится при температуре $470 \pm 5^\circ\text{C}$ с последующей выдержкой при этой температуре в течении 70 минут и охлаждение в воде с температурой 15°C , поэтому начальную температуру T_0 принимаем равной 475°C , а температуру среды при конвективном теплообмене равной 15°C . Для задания конвективного теплообмена используем температурозависимый коэффициент теплоотдачи $\alpha(t)$, определение которого описано в пункте 2 главы III данной работы.

Результаты расчета представлены на рисунке 33, рисунке 34, рисунке 35 в моменты времени 1, 5 и 10 секунд соответственно. Заготовка изображена в разрезе для отображения распределения температуры по толщине, а также в углах призматической заготовки.

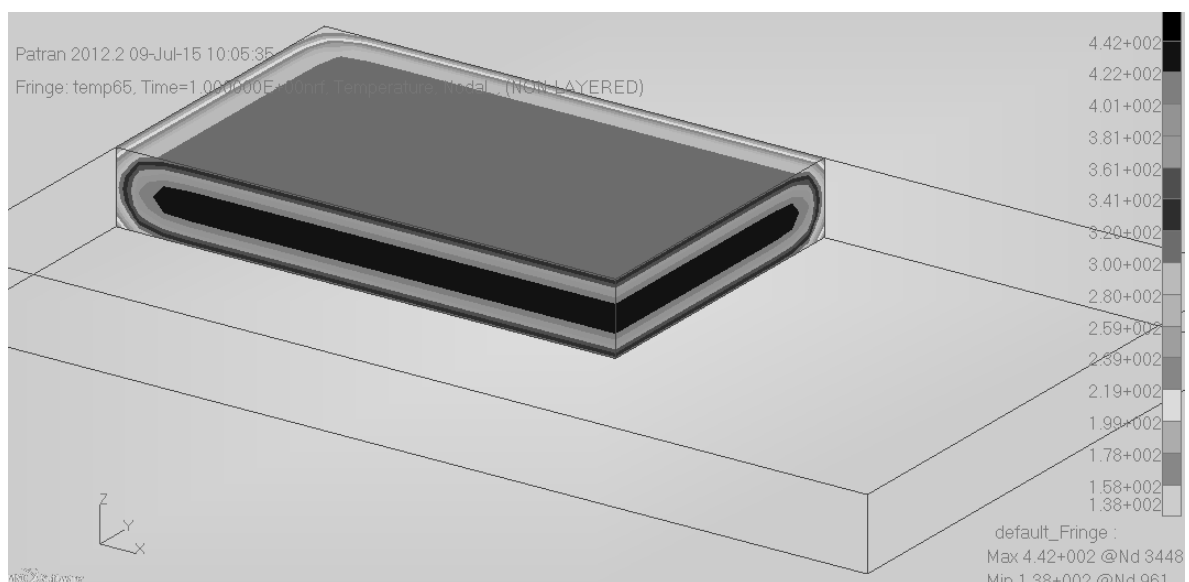


Рисунок 33 – Температурное поле заготовки (габариты 390 240 38 мм, сплав В95) в момент времени $t=1$ секунда

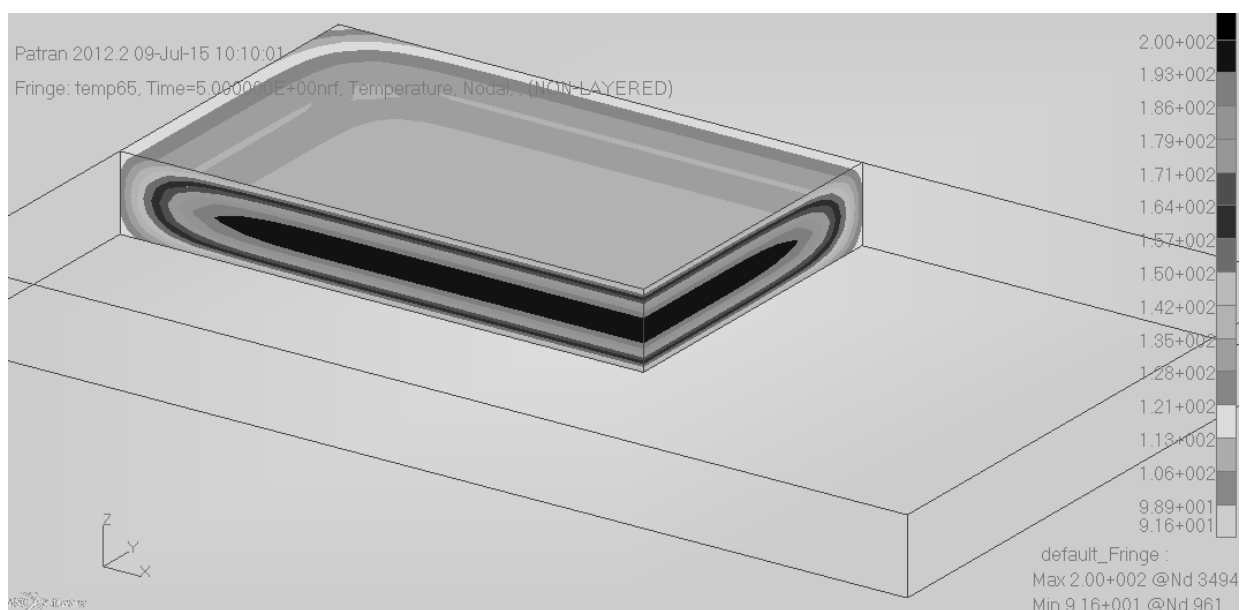


Рисунок 34 – Температурное поле заготовки (габариты 390 240 38 мм, сплав В95) в момент времени $t=5$ секунд

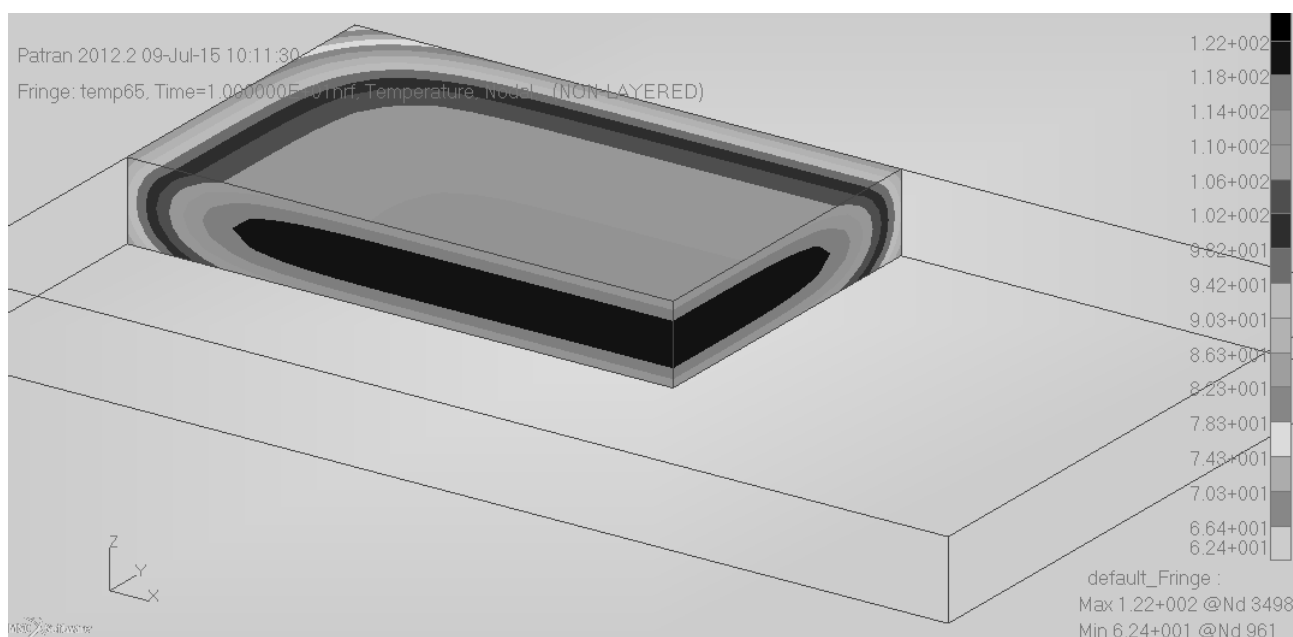


Рисунок 35 – Температурное поле заготовки (габариты 390 240 38 мм, сплав В95) в момент времени $t=10$ секунд

На рис. 36 представлены графики изменения температуры в разных частях заготовки, 1 – в центре заготовки, 2 – на поверхности заготовки, 3 – на гранях

заготовки. Анализируя представленные графики изменения температуры необходимо отметить, что в начальные моменты времени наибольший градиент температур ΔT возникает между центром и гранями заготовки и составляет, порядка 300 °С. Такой большой градиент температур вызывает максимальные температурные напряжения и пластические деформации. Напрашивается вывод о том, что остаточные напряжения в угловых частях заготовки будут максимально отличаться от общей картины напряженного состояния исследуемого тела, что подтверждает технологические рекомендации о необходимости удаления краевых зон термообработанных заготовок [65, 19, 42]. Рассчитанная система тепловых полей с использованием коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ соответствует полученным экспериментальным кривым охлаждения, рассмотренным в пункте 1 настоящей главы с погрешностью до 1 %.

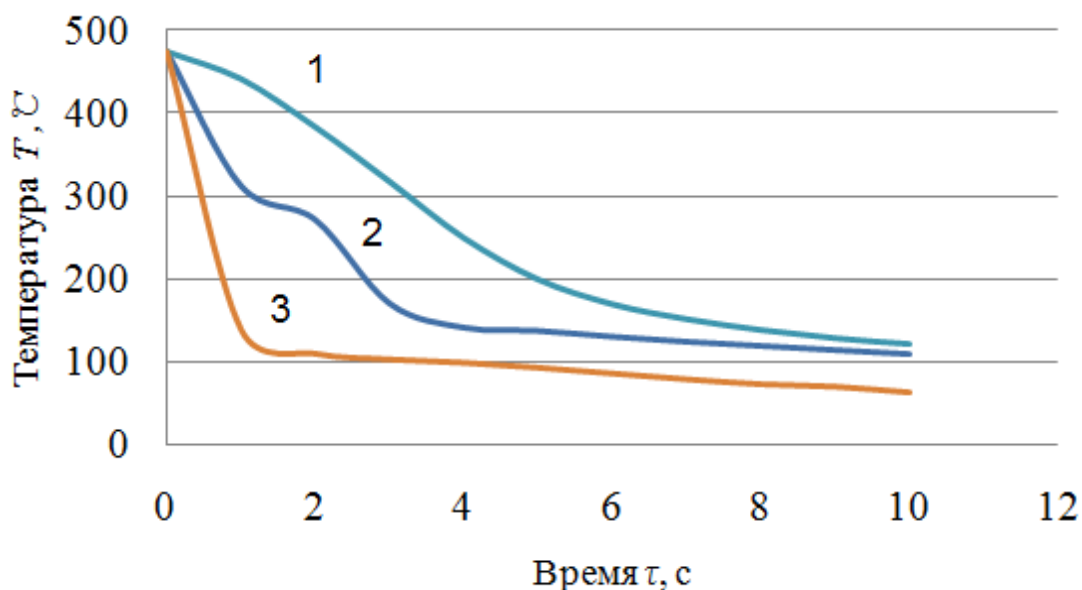


Рисунок 36 – Графики характеризующие изменение температуры в разных частях заготовки, где 1- кривая охлаждения в центре заготовки, 2 – на поверхности заготовки, 3 – в углах заготовки

Расчет остаточных напряжений и деформаций, возникающих в процессе

термической обработки, проводим для заготовки с габаритами 390 240 38 мм из алюминиевого сплава В95. Геометрическая модель для расчетов принимается 3-мерной, а размер элемента мм Нех 8.

Согласно представленной блок-схеме №2 (рис. 15) для расчета напряженно-деформированного состояния необходимо задать ограничения по перемещениям. Для этого производим жесткое закрепление произвольного узла конечно-элементной сетки на теле заготовки, но при анализе расчетных значений не принимаем во внимание напряжения и деформации возникающие в месте закрепления. За расчетные будем принимать значения в симметрично расположенном узле конечно-элементной сетки относительно центра симметрии заготовки.

Результаты расчета распределения и величины остаточных напряжений представлены на рис. 37, 38 в плоскостях ZOY и XOY.

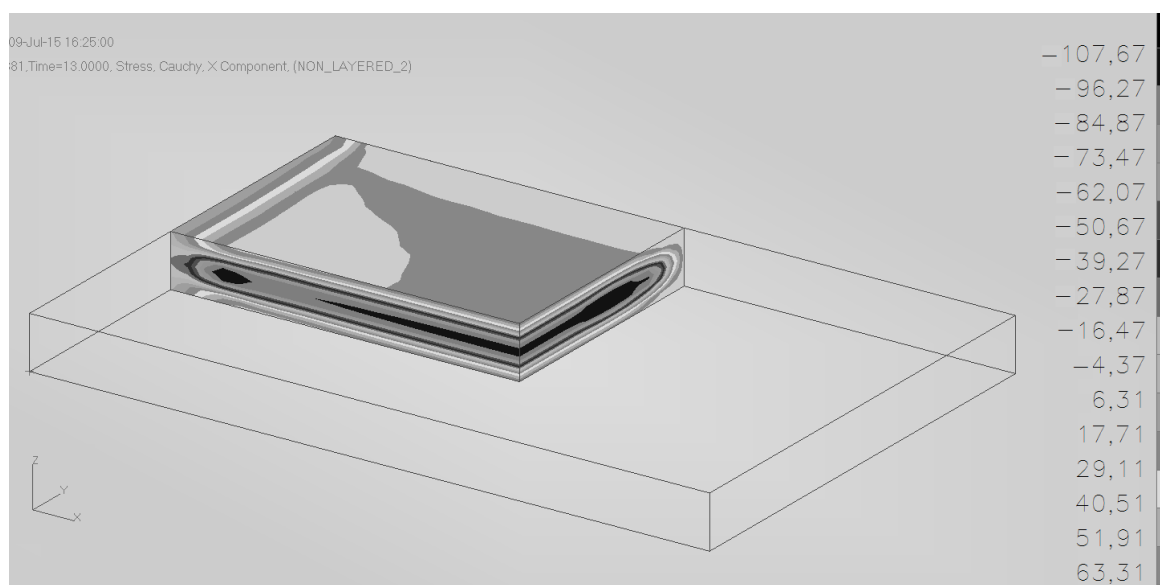


Рисунок 37 – Расчетные остаточные напряжения (МПа), возникающие в процессе термической обработки заготовок (габариты 390 240 38 мм, сплав В95) по толщине в центре заготовки в плоскости ZOY

Анализируя значения, знак и локализацию расчетных остаточных

напряжений по толщине в сечении 5 (рис. 43), а так же остаточные напряжения, полученные экспериментально, экспресс-методом предложенным А.И. Промптовым, Ю.И. Замащиковым и С.К. Каргапольцевым [37, 39], в заготовках с габаритами мм из сплава В95, можно сделать вывод о сходимости представленных данных в центре и на поверхности, с погрешностью менее 15% (рис. 39, 40).

Однако важно отметить, что в работе [48] для определения общих остаточных напряжений и деформаций подкрепленных деталей, полученных при удалении припуска в процессе механической обработки с заготовки, используется выражение:

$$\sigma_{i-1}^0 = \sigma_i^0 + \sigma_P + \sigma_M \quad (34).$$

где – остаточные напряжения в заготовке после удаления с нее припуска; – исходные остаточные напряжения в заготовке; – напряжения растяжения, обеспечивающие уравнивание по силе; – напряжения изгиба, обеспечивающие уравнивание по моменту.

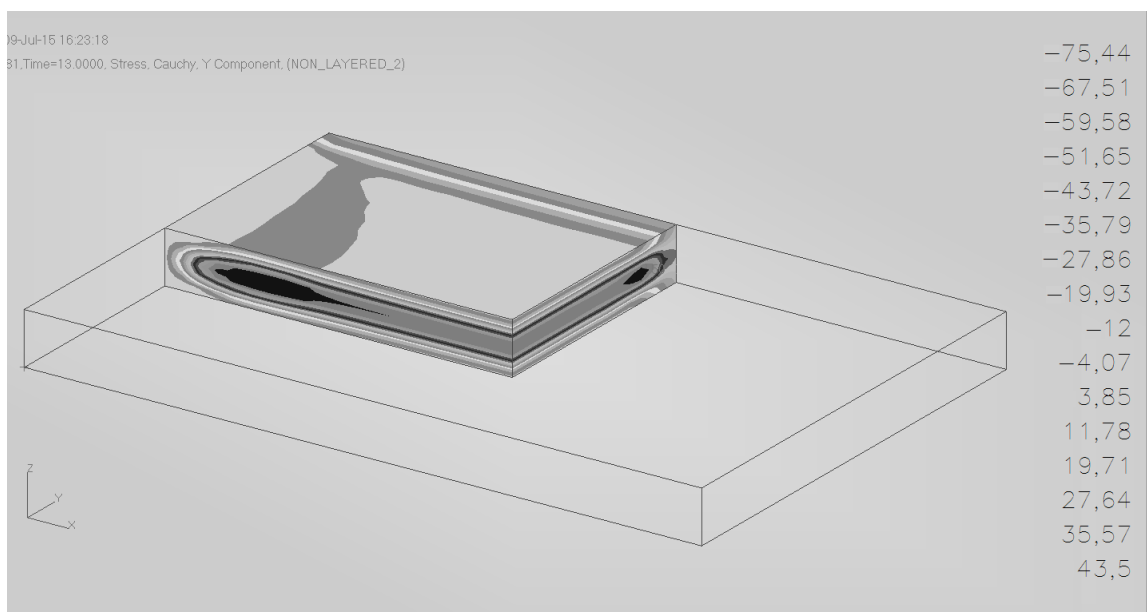


Рисунок 38 – Расчетные остаточные напряжения (МПа), возникающие в процессе термической обработки заготовок (габариты 390 240 38 мм, сплав

В95) по толщине в центре заготовки в плоскости ZOX

Напряжения , рассчитываются по формулам (23) и (24) соответственно:

$$\sigma_P = \frac{\int_{\Delta F} \sigma_i^0 dF}{F} = -\frac{1}{F} \int_F \sigma_i^0 dF \quad (35)$$

где F – площадь поперечного сечения удаленной части заготовки; ΔF – площадь поперечного сечения оставшейся части заготовки

$$\sigma_M = \frac{M_X y}{J_X} = \frac{y}{J_X} \int_{\Delta F} \sigma_{(i-1)}^0 y dF = -\frac{y}{J_X} \int_F \sigma_{(i-1)}^0 y dF \quad (36)$$

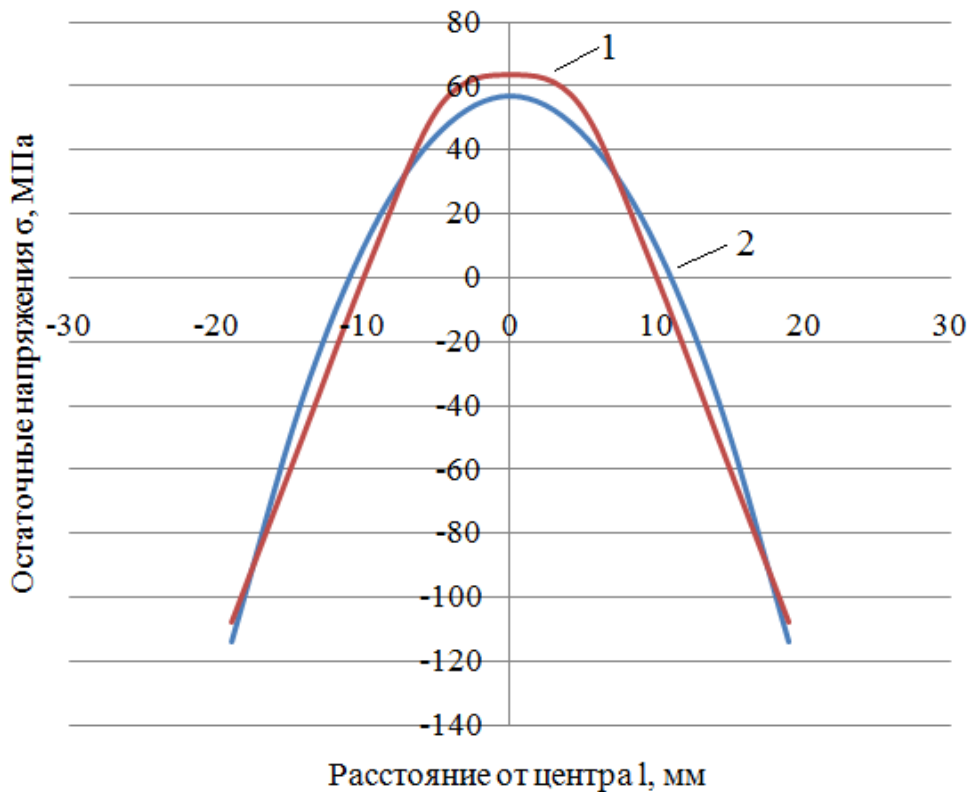


Рисунок 39 – Эпюры термических остаточных напряжений в заготовке (габариты 390 240 38 мм, сплав В95) в плоскости ZOY, 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

Учитывая вышеприведенные зависимости, можно сделать вывод о том, что расчетные значения остаточных напряжений и деформаций подкрепленных деталей определяются в зависимости от площади эпюр поперечного сечения удаленной части заготовки (рис. 41).

Анализируя площади фигур (рис. 42) ограниченных эпюрами экспериментальных и расчетных остаточных напряжений, равные $1664,736 \text{ мм}^2$ и $1778,936 \text{ мм}^2$ соответственно, можно сделать вывод о погрешности 6,86 %. Подобное отклонение в значениях площадей ограниченных фигур эпюрами позволяет производить дальнейшие расчеты остаточных деформаций мало жестких деталей с меньшей погрешностью.

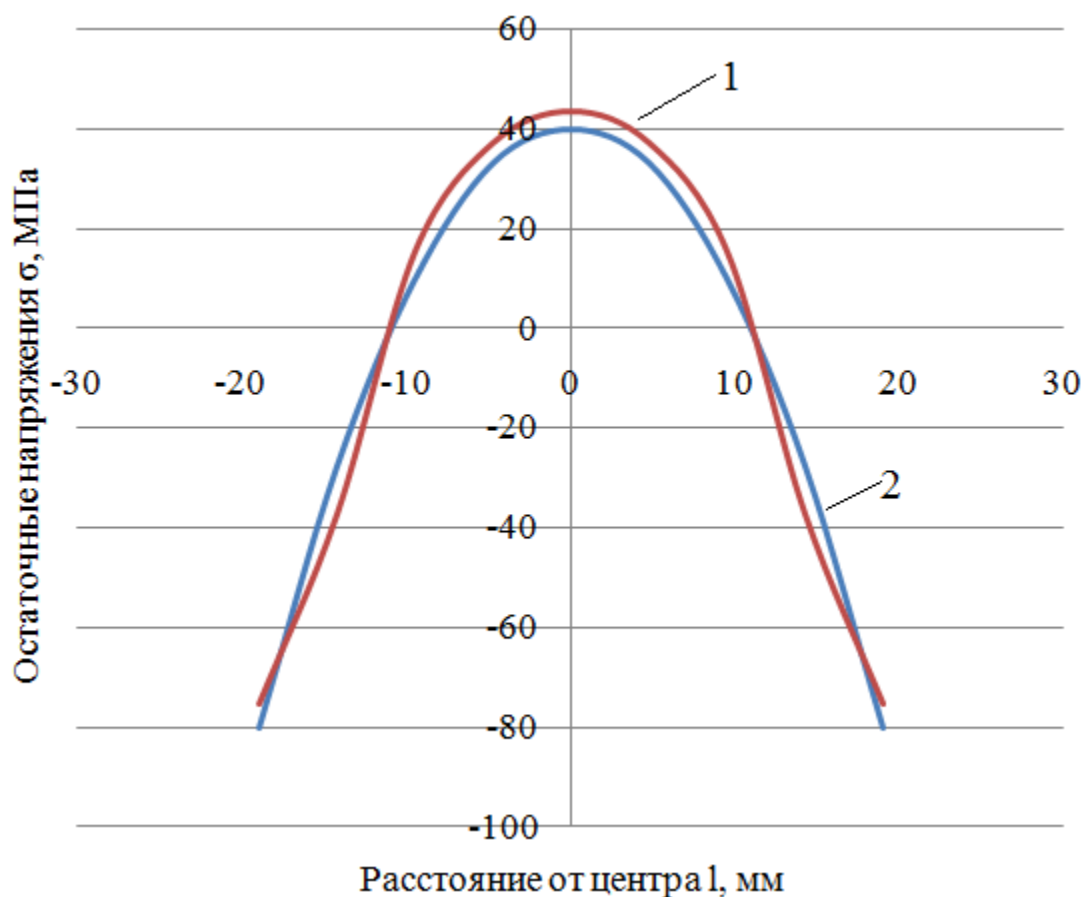


Рисунок 40 – Эпюры термических остаточных напряжений в заготовке (габариты 390 240 38 мм, сплав В95) в плоскости ZOX,
1 – расчетная, 2 – экспериментальная

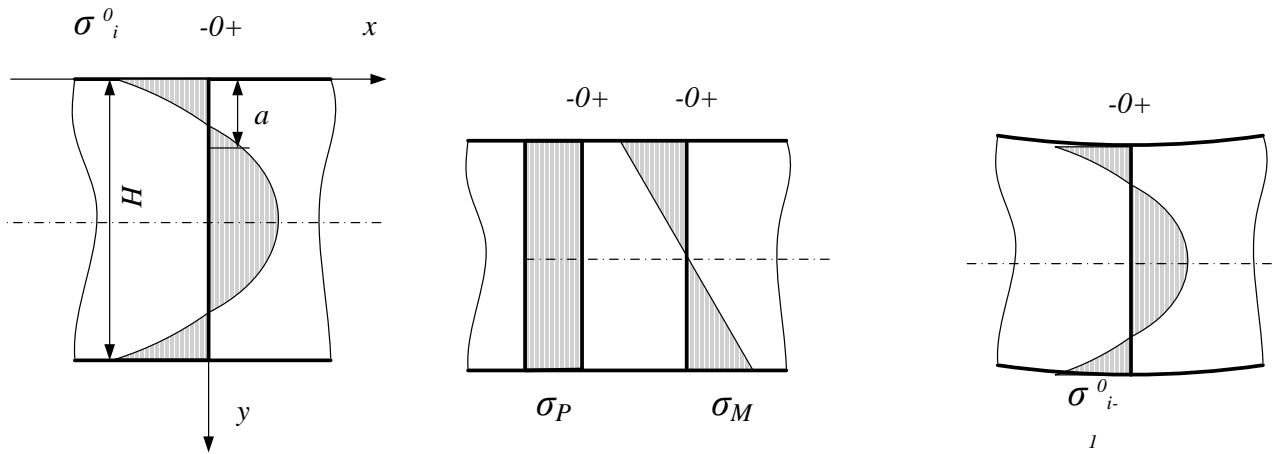


Рисунок 41 – Остаточные напряжения и деформации подкрепленной детали, после удаления припуска

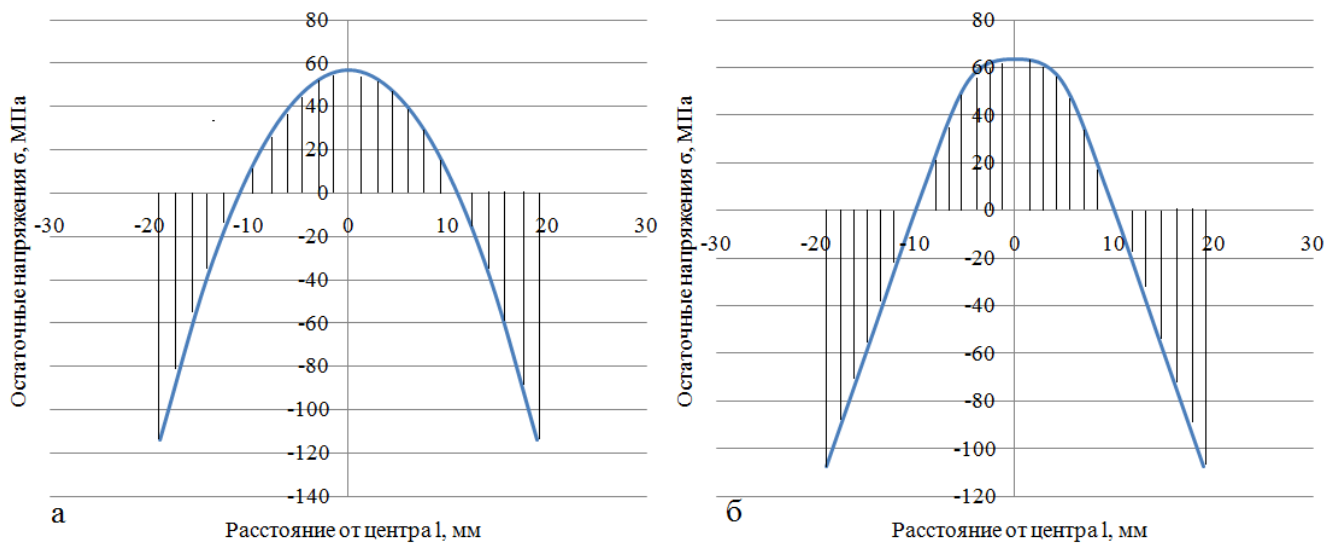


Рисунок 42 – площадь фигур ограниченных эпюрами термических остаточных напряжений в плоскости ZOY заготовки (габариты 390 240 38 мм, сплав В95), а – эпюрой экспериментальных остаточных напряжений, б – эпюрой расчетных остаточных напряжений

Учитывая вышесказанное, расчетные значения остаточных напряжений необходимо принимать для определения остаточных деформаций подкрепленных деталей, полученных при механической обработке из термообработанных плит из алюминиевых сплавов. Результаты расчета остаточных деформаций, полученные

по расчетным значениям термических остаточных напряжений, позволят без разрушения заготовки производить, проектировать технологический процесс и применять рекомендации, предотвращающие появление дефектов хлопунгов, зарезов, утончение полотна.

Дополнительно можно отметить, что предложенная методика расчета остаточных напряжений позволяет определить распределение термических остаточных напряжений в краевых зонах заготовок, величина и распределение которых по предложенному экспериментальному экспресс-методу [37, 39] невозможна.

Так, изменение остаточных напряжений в сечениях 1, 2, 3, 4 и 5 (рис. 43) от края к центру заготовки в плоскости ZOХ вдоль оси Х, через каждые 10 мм, представлены на рис. 44.

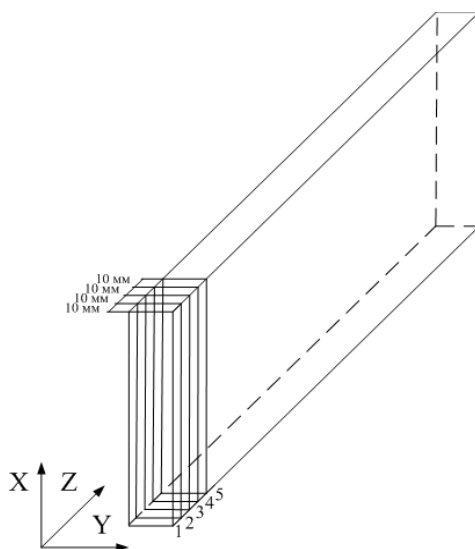


Рисунок 43 – Сечения 1, 2, 3, 4 и 5 в заготовке с размерами 390 240 38 мм

Анализируя представленные графики, можно сделать вывод, что более интенсивное охлаждение заготовок в краевых зонах формируют напряжения, сильно отличающиеся по величине и характеру распределения от остаточных напряжений, которые наблюдаются в центральной части заготовки, что подтверждает технологические рекомендации о необходимости удаления краевых зон заготовок [65, 45, 46] размерами равным толщине заготовки.

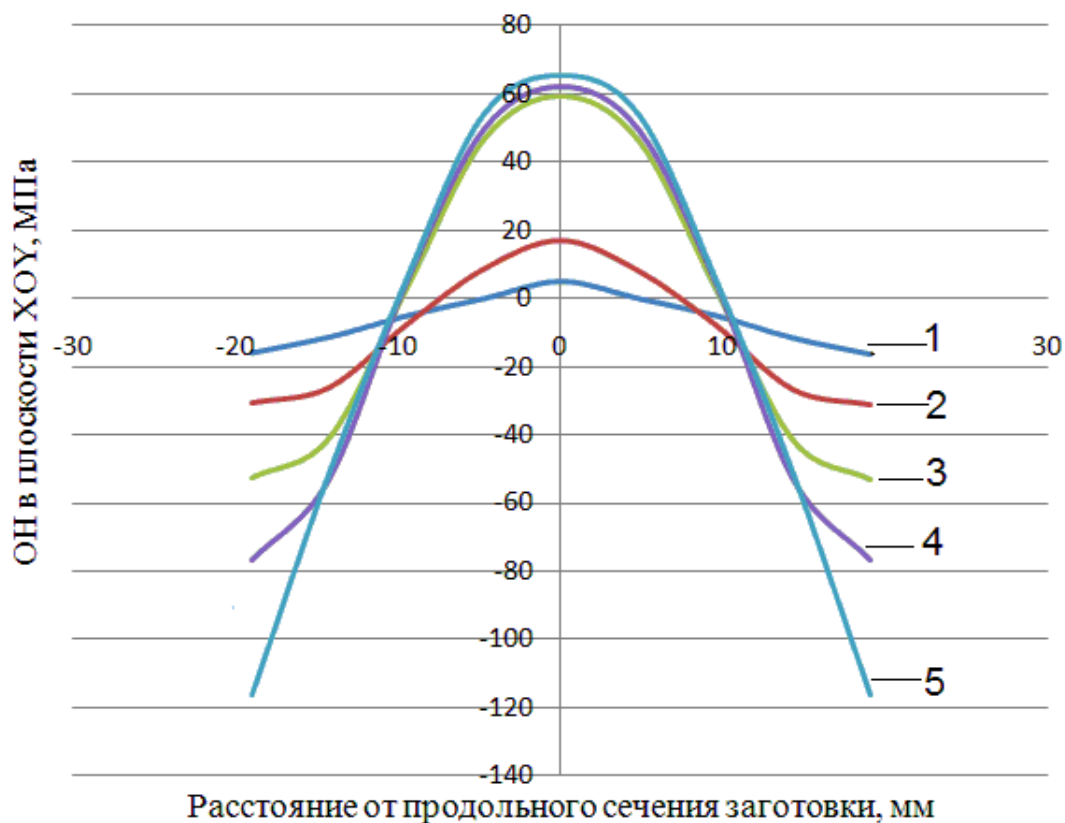


Рисунок 44 – Остаточные напряжения на грани заготовки, 1 – эпюра напряжений в сечении 1 на грани заготовки, 2 – эпюра напряжений в сечении 2 на расстоянии 10 мм от грани заготовки, 3 – 3, 20 мм, 4 – 4, 30 мм, 5 – эпюра напряжений в сечении 5

Однако, следует заметить, после удаления краевых зон, в оставшейся части заготовки наблюдается параболический характер распределения остаточных напряжений, но уровень напряжений на поверхности заготовки (рис. 37, 38) непостоянный в разных частях оставшейся части заготовки.

Так в заготовке с габаритами _____ мм из алюминиевого сплава В95 максимальный уровень поверхностных напряжений составляет - 117,52 МПа, а минимальный уровень напряжений – 103,67 МПа (рисунок 45).

Отклонение максимальных значений поверхностных остаточных напряжений от минимальных составляет 14,07 %.

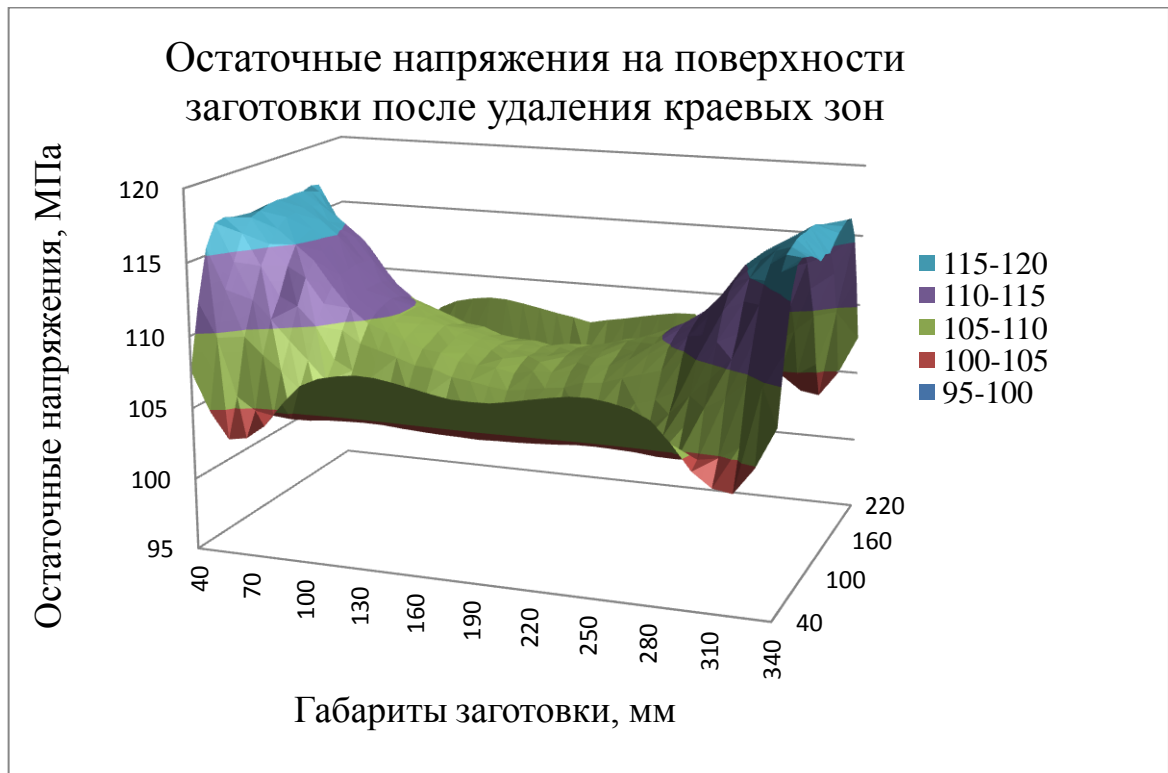


Рисунок 45 – Неравномерное распределение поверхностных остаточных напряжений

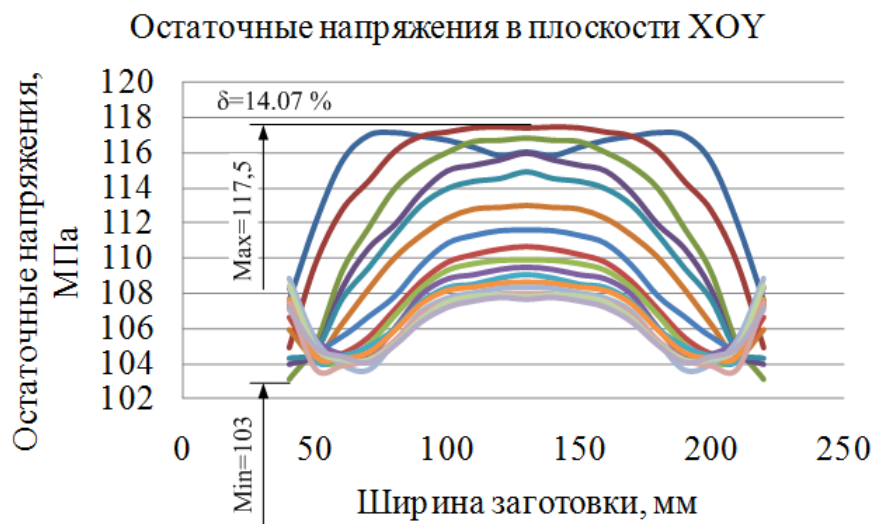


Рисунок 46 – Отклонение поверхностных остаточных напряжений

Подобная картина распределения напряжений подтверждается экспериментальными данными. Так в работе [52] при экспериментальном

определении термических остаточных напряжений на поверхности заготовки экспресс-методом предложенным Ю.И. Замашиковым, С.К. Каргапольцевым (А.С. №1643928) в разных частях заготовки с габаритами мм из алюминиевого сплава АК4-1 минимальные и максимальные значения равны -81,7 МПа и -101,5 МПа соответственно. Отклонение минимального от максимального значения составляет 19,8%.

Неравномерное распределение остаточных напряжений в оставшейся части заготовки объясняется влиянием краевых зон заготовок, подвергшихся наиболее неравномерному охлаждению, с наибольшим градиентом температур ΔT и максимальными температурными напряжениями и деформациями (рис. 37, 38).

Использование предложенной методики позволяет изучить формирование и изменение температурных напряжений и деформаций в процессе термической обработки. Изменение температурных напряжений на поверхности и в центре заготовки в процессе закалки происходит, как по величине, так и по знаку.

Весь процесс термической обработки (закалки) алюминиевого сплава разобьем на этапы в соответствии с экстремальными точками графика изменения температурных напряжений на поверхности заготовки. В начальный момент времени, когда температура по всему телу постоянная $T=const$ (рис. 48) и температурный градиент $\Delta T=0$ (рис. 49), температурные напряжения $\sigma=0$. Далее начинается процесс охлаждения (этап 1), в заключении которого наблюдается экстремум температурного градиента ΔT (рис. 49) между поверхностью и внутренними слоями заготовки, который формирует максимальные температурные растягивающие напряжения на поверхности заготовки и максимальные сжимающие напряжения во внутренних слоях заготовки (рис. 47), составляющие 173 и -60 МПа соответственно.

Принимая во внимание уменьшение значения предела текучести σ_T материала заготовки (алюминиевый сплав В95) при увеличении температуры (рис. 31) уже на начальной стадии термической обработки возникают

пластические деформации.

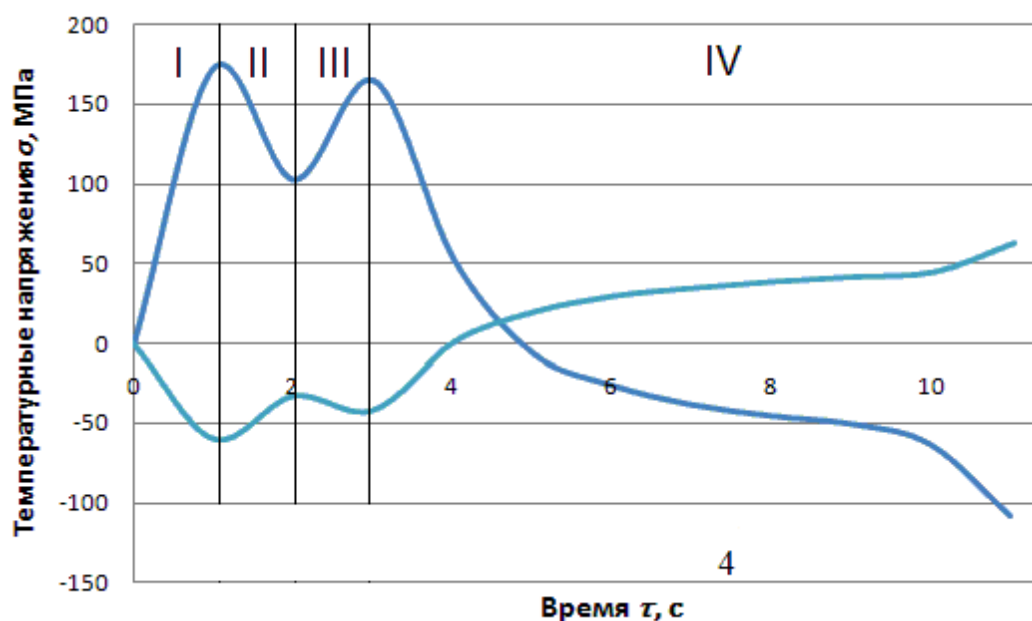


Рисунок 47 – Изменение напряжений заготовки (габариты 390*240*38 мм, алюминиевый сплав В95) в процессе термической обработки, где 1 – напряжения на поверхности заготовки в сечении 5, 2 – напряжения в центре заготовки в сечении 5

Далее в процессе охлаждения (этап 2) скорость охлаждения поверхности заготовки $v_{охл}$ снижается (рис. 50) в соответствии с изменением температурозависимого коэффициента теплоотдачи α (рис. 21), что приводит к снижению градиента температуры ΔT (рисунок 49) и уменьшению температурных напряжений. На третьем этапе скорость охлаждения $v_{охл}$ опять увеличивается и градиент температуры ΔT возрастает, что ведет к увеличению температурных напряжений (рис. 47). На заключительном этапе (этап 4) значения коэффициента теплоотдачи α снижаются, благодаря переходу от пузырькового режима кипения к свободной конвекции, что приводит к снижению скорости охлаждения $v_{охл}$ (рис. 50) и уменьшению температурного градиента ΔT между поверхностью и центром заготовки.

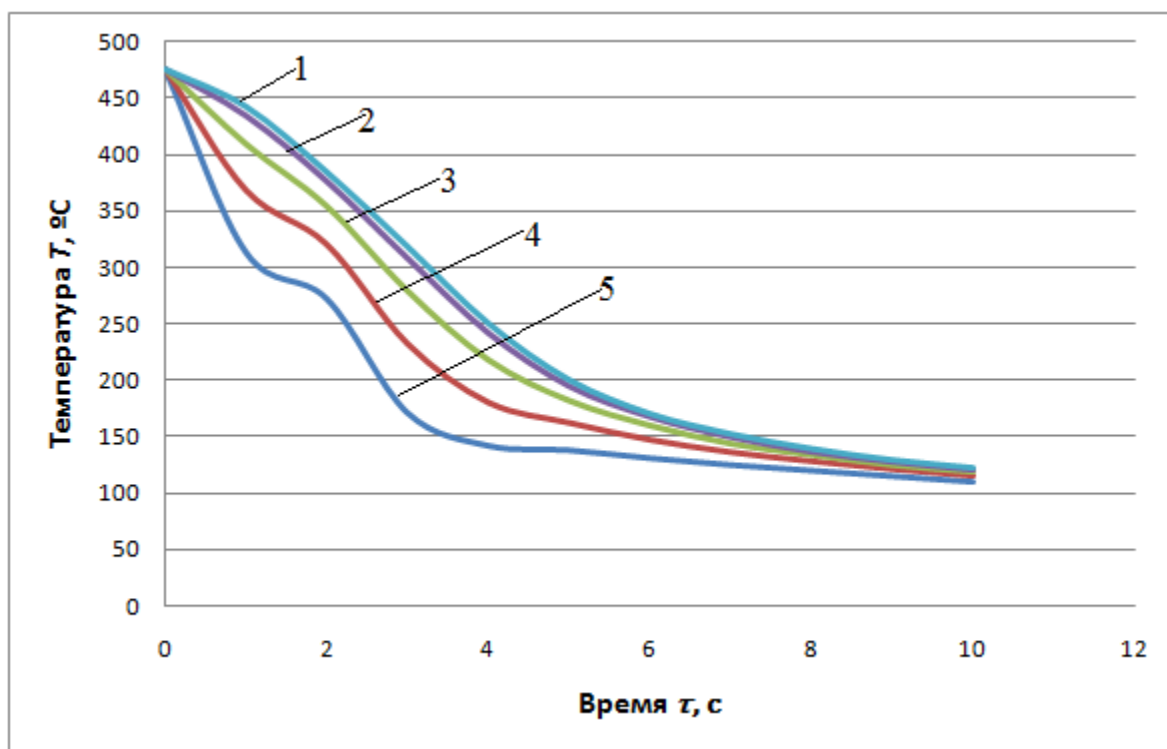


Рисунок 48 – Кривые охлаждения заготовки (габариты 390*240*38 мм, алюминиевый сплав В95) по толщине в процессе закалки, 1 - кривая охлаждения на поверхности, 2 - кривая охлаждения на расстоянии 4,75 мм от поверхности, 3 - кривая охлаждения на расстоянии 9,5 мм от поверхности, 4 – кривая охлаждения на расстоянии 14,25 мм от поверхности, 5 – кривая охлаждения на расстоянии 19 мм от поверхности, в центре заготовки

Так же важно отметить, что максимальные температурные напряжения, возникающие на первой секунде термической обработки, вызывают максимальный уровень пластических и упругих деформаций (рис. 51).

В процессе дальнейшего охлаждения при понижении температуры заготовки предел значения предела текучести σ_T повышается и дальнейшие деформации ϵ происходят в упругой зоне (рис. 52).

Важно отметить, что температурные растягивающие напряжения на поверхности и сжимающие напряжения во внутренних слоях заготовки меняют свой знак на 3 и 4 секунде соответственно (рис. 47) и при дальнейшем

охлаждении сохраняют свой знак, только увеличивая значение напряжений, представляющих собой остаточные напряжения.

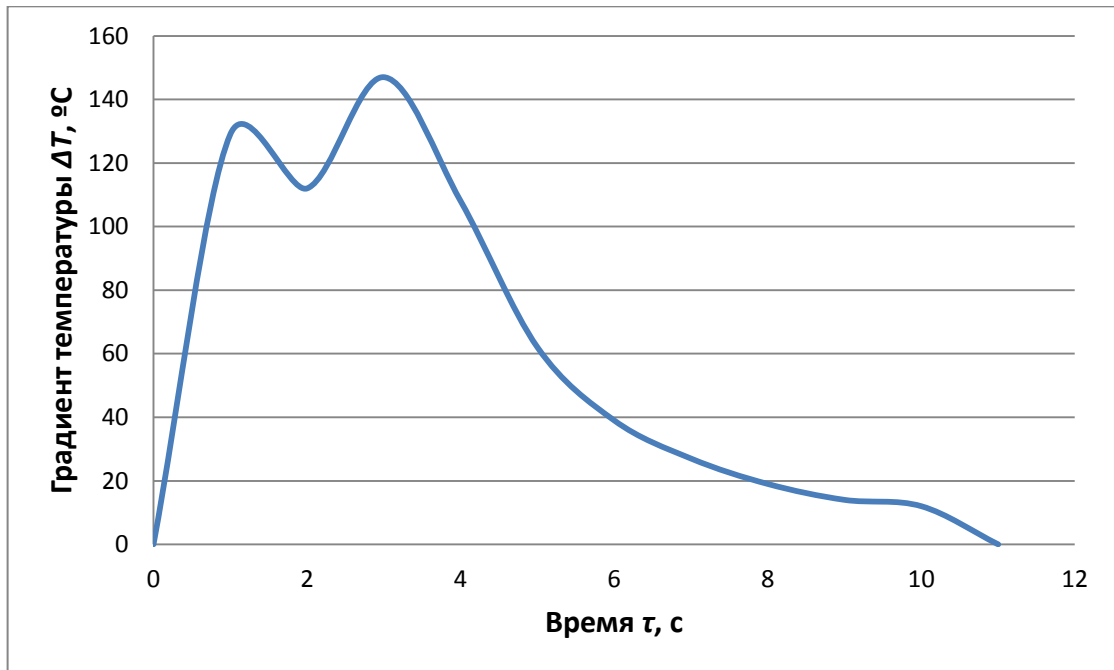


Рисунок 49 – Кривая характеризующая градиент температуры ΔT между центром и поверхностью заготовки по толщине в процессе закалки

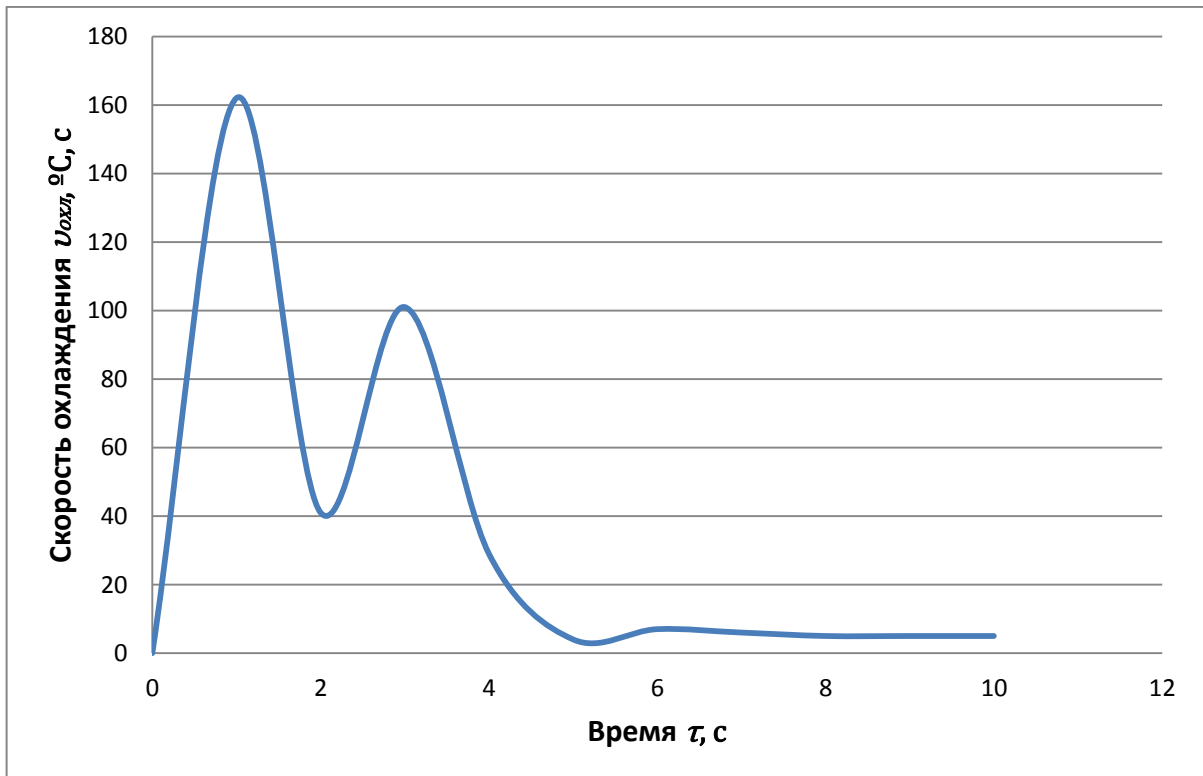


Рисунок 50 – Кривая характеризующая изменение скорости охлаждения

$v_{охл}$ поверхности заготовки

Учитывая вышесказанное, напрашивается вывод о том, что даже при наличии температурного градиента ΔT между поверхностью и центром заготовки по толщине равным 62 в момент времени $T=5$ секунд, напряжения на поверхности и в центре заготовки меняют знак. Это свидетельствует о том, что возникшие на первых секундах закалки пластические деформации формируют напряжения, превышающие температурные напряжения, вызванные градиентом температур ΔT , соответствующие переходу из пластического состояния в упругое. При чем, температуры данного перехода для различных сечений по глубине различны (рис. 41, 42).

Учитывая, что уровень термических остаточных напряжений зависит от величины пластических деформаций, сформированных в процессе закалки, для снижения уровня термических остаточных напряжений необходимо снизить уровень температурных напряжений и деформаций. Для снижения величины пластических деформаций необходимо снизить температурный градиент ΔT и скорость охлаждения $v_{охл}$ на начальном этапе термической обработки. Так как необходимым условием проведения закалки является охлаждение изделия со скоростью охлаждения выше критической $v_{кр}$, для снижения уровня остаточных напряжений необходимо снизить скорость охлаждения заготовки до скорости, незначительно превышающей критическую скорость охлаждения $v_{кр}$ сплава.

Так для проведения закалки высокопрочного алюминиевого сплава В95 производят охлаждение в воде с температурой 15 °С, и достигают в первую секунду закалки скорость охлаждения на поверхности заготовки $v_{охл} = 162$ °С (рис. 50), учитывая, что критическая скорость охлаждения $v_{охл\ крит}$ для сплава В95 колеблется в диапазоне 100-120 °С/с [69], для снижения термических остаточных напряжений σ^0 охлаждение необходимо производить со скоростью 130 °С/с. Для других алюминиевых сплавов, используемых при производстве маложестких деталей, критическая скорость охлаждения $v_{кр}$ (таблица 2) имеет меньшие значения [69], что позволяет снижать скорость охлаждения и величину остаточных напряжений σ^0 .

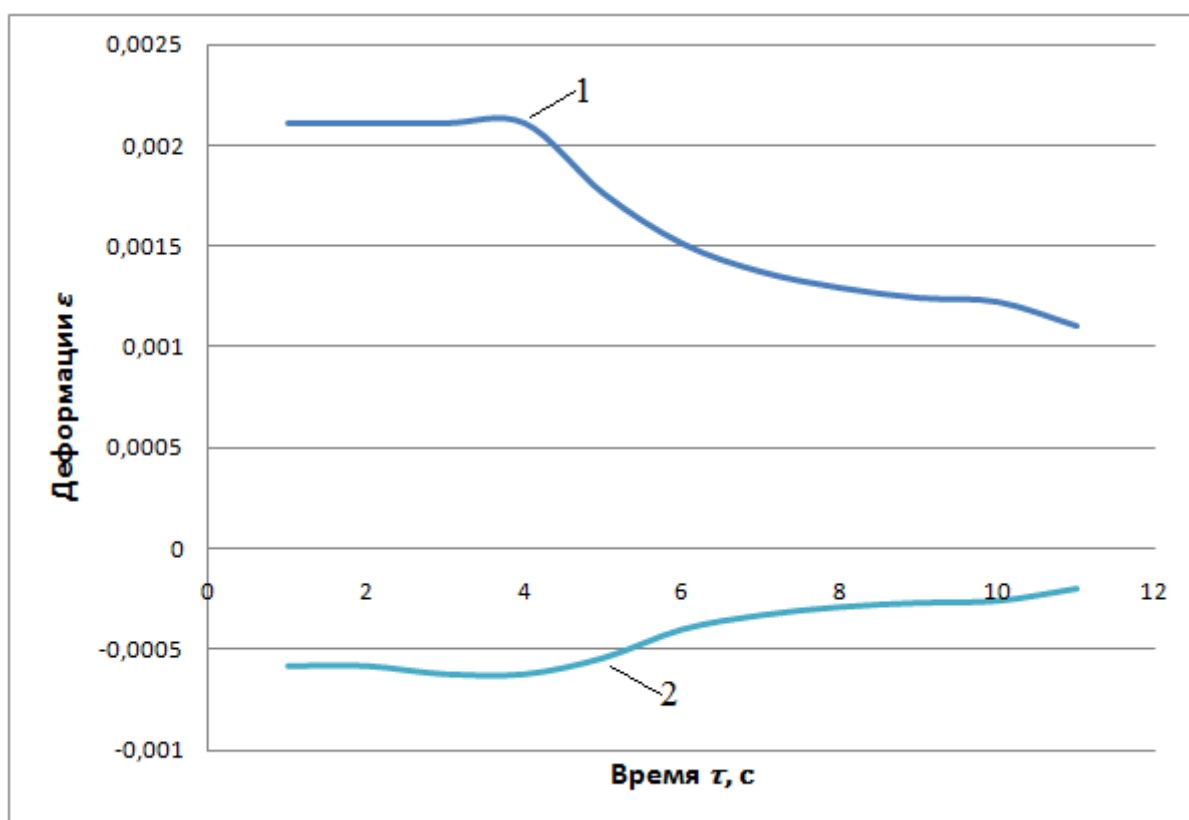


Рисунок 51 – Деформации ϵ в процессе термической обработки, где 1 - деформации на поверхности заготовки по толщине, 2 - деформации в центре заготовки

Таблица 2

Критическая скорость охлаждения алюминиевых сплавов

Сплав	Система	$v_{кр}, ^\circ\text{C}/\text{c}$
В93	Al-Zn-Mg-Cu	3-5
АК4-1	Al-Cu-Mg	10-20
Д16	Al-Cu-Mg	60-90
В95	Al-Zn-Mg-Cu с добавками Mn и Cr	100-120

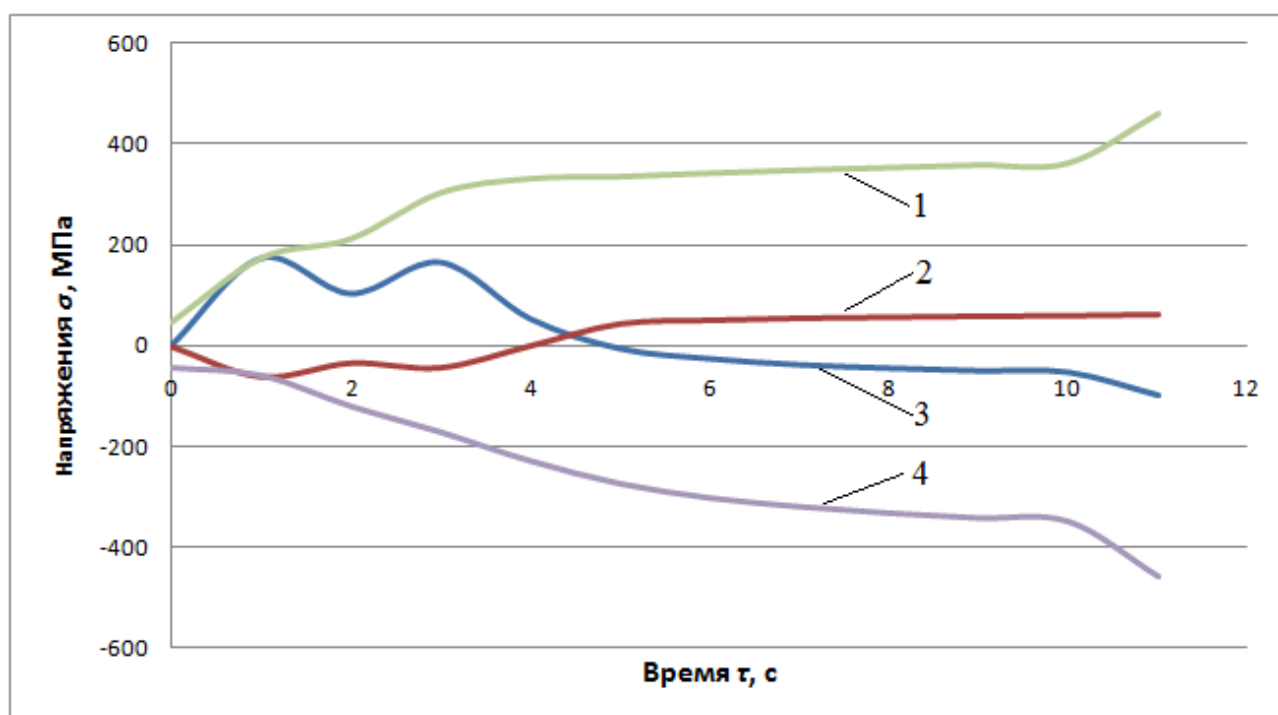


Рисунок 52 – Кривые зависимости предела текучести σ_T материала заготовки от температуры во времени в процессе закалки, где 1 – зависимость предела текучести σ_T поверхностного слоя от времени τ , 2 – зависимость температурных напряжений в центре заготовки σ^II от времени τ , 3 – зависимость температурных напряжений на поверхности заготовки σ^I от времени τ , 4 – зависимость предела текучести σ_T центрального слоя от времени τ .

4.3 Система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей

Для достижения цели научного исследования была решена поставленная

задача по разработке системы компьютерного моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов. Данная система описывается блок-схемой представленной на рис. 53. Представленная схема состоит четырех основных этапов.

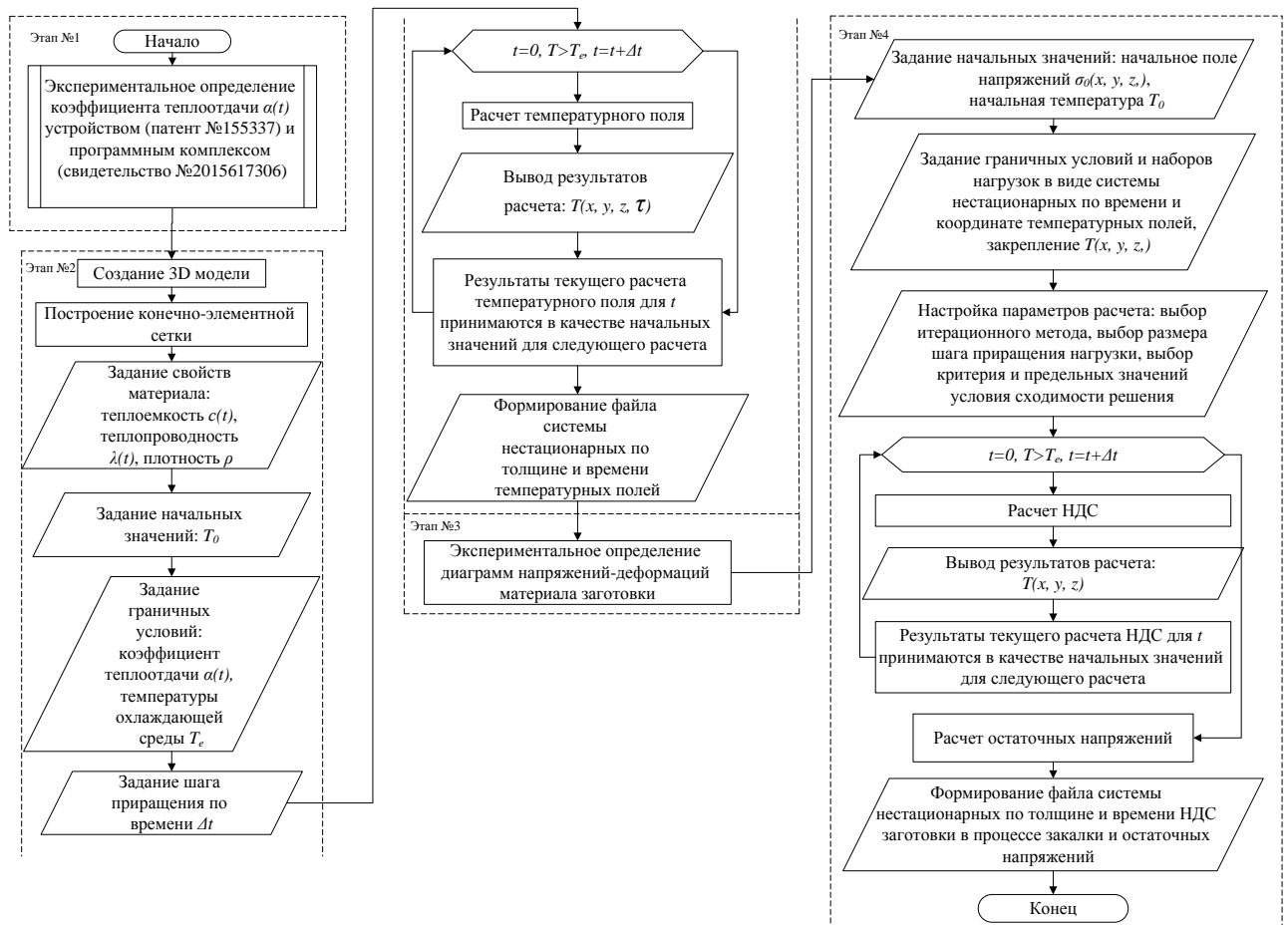


Рисунок 53 – Система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве мало жестких деталей

Этап №1 заключается в экспериментальном определении значений температурозависимого коэффициента теплоотдачи при помощи, разработанного и описанного в главе 3 данной работы устройства (патент №155337) и разработанного программного комплекса (свидетельство о государственной регистрации №2015617306). Блок-схема, описывающая последовательность

действий необходимых для определения коэффициента теплоотдачи представлена на рисунке 26. В процессе определения коэффициента необходимо производить нагрев и охлаждение заготовки. Температура и скорость нагрева опытного образца, состав охлаждающей среды и ее температура определяются условиями термической обработки, предусмотренными в производственной инструкции по термической обработке заготовок принятыми на предприятии-изготовителе маложестких деталей. Условия термической обработки зависят от марки сплава и габаритов заготовки. Инструкция по использованию разработанного программного обеспечения указана в приложении №3. Выходной файл программного комплекса расчета коэффициента теплоотдачи, имеет расширение *.csv. Данный формат позволяет импортировать табличные значения коэффициента теплоотдачи в программный комплекс MSC Sinda, Nastran, Marc для последующего расчета нестационарного теплового поля.

Этап №2 описывает последовательность этапов расчета системы нестационарных по толщине и по времени тепловых полей. Расчет производится в программном конечноразностном комплексе MSC Sinda, специализирующимся на решении тепловых задач. В процессе проведения исследования выявлено, что при построении конечно-элементной сетки, количество элементов по толщине не должно быть меньше 6, а максимальное соотношение сторон не должно превышать 2,5. Начальные и граничные условия принимаются согласно производственным инструкциям, принятым на заводе-изготовителе маложестких деталей. Принимая во внимание одинаковый диапазон температур закалки для большинства алюминиевых сплавов, можно принять шаг приращения по времени Δt равным 1 секунде. Результаты расчета теплового поля представлены в выходном файле MSC Sinda с расширением *.nrf, который в дальнейшем используется в блоке №4 для создания начальных и граничных условий при расчете напряженно-деформированного состояния заготовки.

Этап №3 заключается в экспериментальном определении диаграмм

напряжений-деформаций в диапазоне температур закалки, характеризующих механические свойства материала заготовки. Измерение производится согласно стандартам ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9651-84. Данный этап проводится один раз для каждой марки сплава, подвергаемого термической обработке. При повторных расчетах, используются ранее полученные результаты.

Этап №4 описывает расчет напряженно-деформированного состояния заготовки, формируемого из-за неравномерного охлаждения, возникающего в процессе термической обработки. Начальные значения деформаций и напряжений принимаются равными нулю, так как в процессе значительного нагрева все напряжения и деформации подвергаются релаксации. В качестве температурной нагрузки загружаются результаты расчета теплового поля, полученные в MSC Sinda. Для закрепления заготовки применяем жесткое закрепление произвольного узла. Результаты расчета в данном узле будут, являться ложными, а реальные значения будут приниматься такими же, как в узле расположенным симметрично относительно центра симметрии. При настройке параметров расчета необходимо выбрать нелинейный тип анализа SOL 600 (для решения будет использован пакет MSC Marc для нелинейного анализа), итерационный метод – метод Ньютона-Рафсона, размер шага приращения нагрузки выбирается автоматический. Так же на этапе №4 формирует выходной файл, включающий результаты проведенного расчета. Расчет производим методом конечных элементов с использованием MSC Nastran, Marc и пре- постпроцессора MSC Patran. Учитывая выбор нелинейного типа анализа SOL 600, выходной файл имеет расширение *.t16.

Разработанная система компьютерного моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений позволяет определять расчетным способом напряжения, с погрешностью не более 10%, без разрушения заготовки, учитывая неравномерное распределение остаточных напряжений по поверхности заготовки. Так же разработанная система компьютерного моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений

позволяет изучить процесс формирования температурных напряжений и деформаций в процессе проведения термообработки и давать рекомендации по корректировке условий с целью минимизации остаточных напряжений и деформаций.

4.4 Разработка алгоритма уточненного расчета локальных остаточных деформаций с использованием системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений

В работе [65], представлена математическая модель, формирования локальных остаточных деформаций полотна детали между ребрами. Согласно которой расчет локальных остаточных деформаций производится в соответствии с алгоритмом (рис. 54).

Расчет по зависимостям математической модели производится для наиболее опасных, с точки зрения появления максимальных локальных остаточных деформаций, ячеек:

- с наибольшими габаритными размерами;
- со значительно различающимися по соотношению сторон a/b
- со свободной стороной.

Для определения локальной остаточной деформации в качестве действующих напряжений и моментов приняты зависимости (3):

Результатом расчетов является наибольшее значение локальной деформации f_{max} изгиба полотна ячеек. Далее значения локальной деформации f изгиба полотна используются для:

- проверки соответствия с допусками на прямолинейность и неплоскостность;
- проверки устойчивости полотна детали между ребрами $\sigma'_{x,кр} < \sigma_x$, $\sigma'_{z,кр} < \sigma_z$, где $\sigma'_{x,кр}$, $\sigma'_{z,кр}$ - критические сжимающие напряжения, учитывающие коэффициент запаса устойчивости;

- определения максимально допустимых значений деформаций для правки $f_{доп}$;
- доработки конструкции маложесткой детали с целью снижения уровня локальных деформаций и предотвращения дефектов.



Рисунок 54 – Алгоритм расчета локальных остаточных деформаций
полотна детали

В представленном алгоритме (рис. 56) минимизации общих и локальных остаточных деформаций при определении поверхностных остаточных напряжений σ_{nx}^o , σ_{nz}^o принимают допущение, что после удаления краевых зон

заготовок остаточные напряжения на поверхности имеют одинаковые значения. Однако, учитывая, что в работе [52] представлены результаты экспериментального исследования остаточных напряжений на поверхности заготовки, а так же результаты проведенных в данной работе расчетов, согласно которым уровень напряжений может колебаться в пределах 20 %, а так же результаты расчета полученные в главе №3 настоящей работы, определение локальных остаточных деформаций по экспериментальным значениям будет изначально иметь значительную неоправданную погрешность. В таком случае реальные значения остаточных деформаций полотна заготовки, формируемые в процессе снятия припуска, будут отличаться от расчетных значений деформаций, вычисленных по величине остаточных напряжений на поверхности заготовки. Так рассчитаны остаточные деформации полотна толщиной 0,0015 м для ячейки с габаритами 100×100 мм маложесткой детали, полученной из заготовки алюминиевого сплава В95 с габаритами 100×100 мм, при величине остаточных напряжений на поверхности заготовки $\sigma_{n,x}^o = 114 \text{ МПа}$ $\sigma_{n,z}^o = 80 \text{ МПа}$ и $\sigma_{n,x}^o = 136,8 \text{ МПа}$ $\sigma_{n,z}^o = 96 \text{ МПа}$. Тогда крутящий момент и сжимающие напряжения, действующие на полотно толщиной 0,0015 м будут равны $1,167$ Н·м, $0,819$ Н·м, при величине поверхностных остаточных напряжений $\sigma_{n,x}^o = 114 \text{ МПа}$ $\sigma_{n,z}^o = 80 \text{ МПа}$, и $1,4$ Н·м, $0,982$ Н·м, при величине поверхностных остаточных напряжений $\sigma_{n,x}^o = 136,8 \text{ МПа}$ $\sigma_{n,z}^o = 96 \text{ МПа}$. Тогда остаточные деформации полотна будут равны $f_{max} = 0,31$ мм и $f_{max} = 0,39$ мм, при значениях поверхностных остаточных напряжений отличающихся на 20%. Результаты сравнения прогибов позволяют сделать вывод о том, что увеличение уровня поверхностных остаточных напряжений на 20% обеспечивает прогиб полотна, больший на 25,8%.

Поэтому, неправильно рассчитанные значения локальных остаточных деформаций полотна подкрепленной ячейки не позволят предотвратить появление

таких дефектов, как зарезы, ступеньки, утончение полотна, хлопунуы.

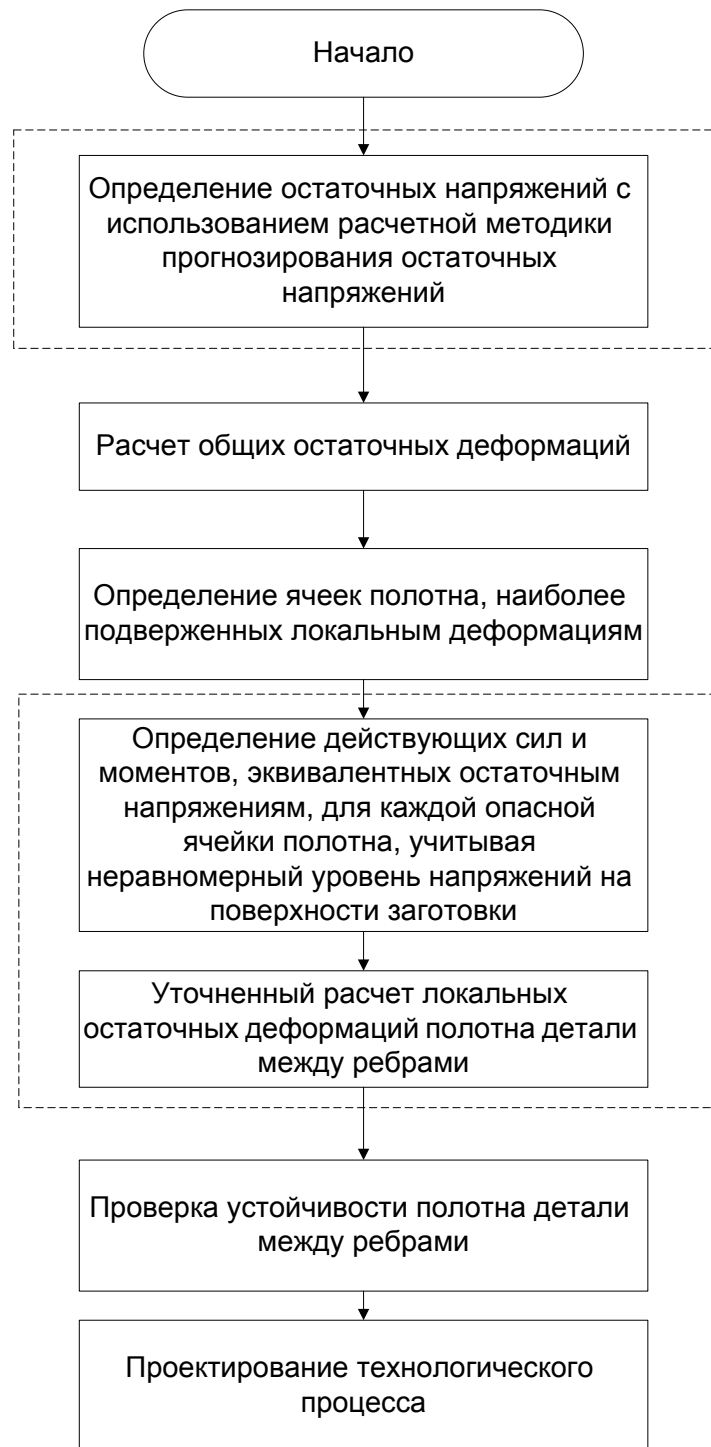


Рисунок 55 – Алгоритм уточненного расчета локальных остаточных деформаций полотна детали

Следовательно, рассчитанные локальные деформации, полученные по экспериментальным значениям остаточных напряжений, не позволят эффективно

корректировать технологический процесс и конструкцию маложесткой детали в целях минимизации деформаций. Учитывая вышесказанное и результаты расчетных значений остаточных напряжений, отражающие реальный уровень напряжений по поверхности заготовки, для более точного расчета локальных остаточных деформаций необходимо использовать систему компьютерного моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений.

4.5 Использование системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений для минимизации общих и локальных остаточных деформаций

В работе [65] представлен алгоритм (рис 56) автоматической системы проектирования технологических процессов изготовления маложестких деталей, необходимой для минимизации общей и локальной деформаций, возникающих при механической обработке термически обработанных заготовок типа пластин из алюминиевых сплавов.

Алгоритм минимизации общих деформаций заключается в определении остаточных напряжений заготовки разрушающим экспресс-методом (А.С. №1643928 от 22.12.90), расчете остаточных деформаций, возникающих вследствие перераспределения остаточных напряжений при удалении припуска на механическую обработку, и проведении комплекса мероприятий по снижению уровня остаточных деформаций. Одним из способов минимизации деформаций в представленном алгоритме является снижение скорости охлаждения заготовки.

Без стройной системы, включающей расчет скорости охлаждения и определения ее оптимальных значений, превышающих критическую скорость охлаждения по всей толщине заготовки, корректировка условий термической обработки представляется весьма сложной задачей.

При этом, согласно представленного алгоритма (рис. 56), после каждой корректировки условий термической обработки необходимо определять

остаточные напряжения разрушающим экспресс-методом.

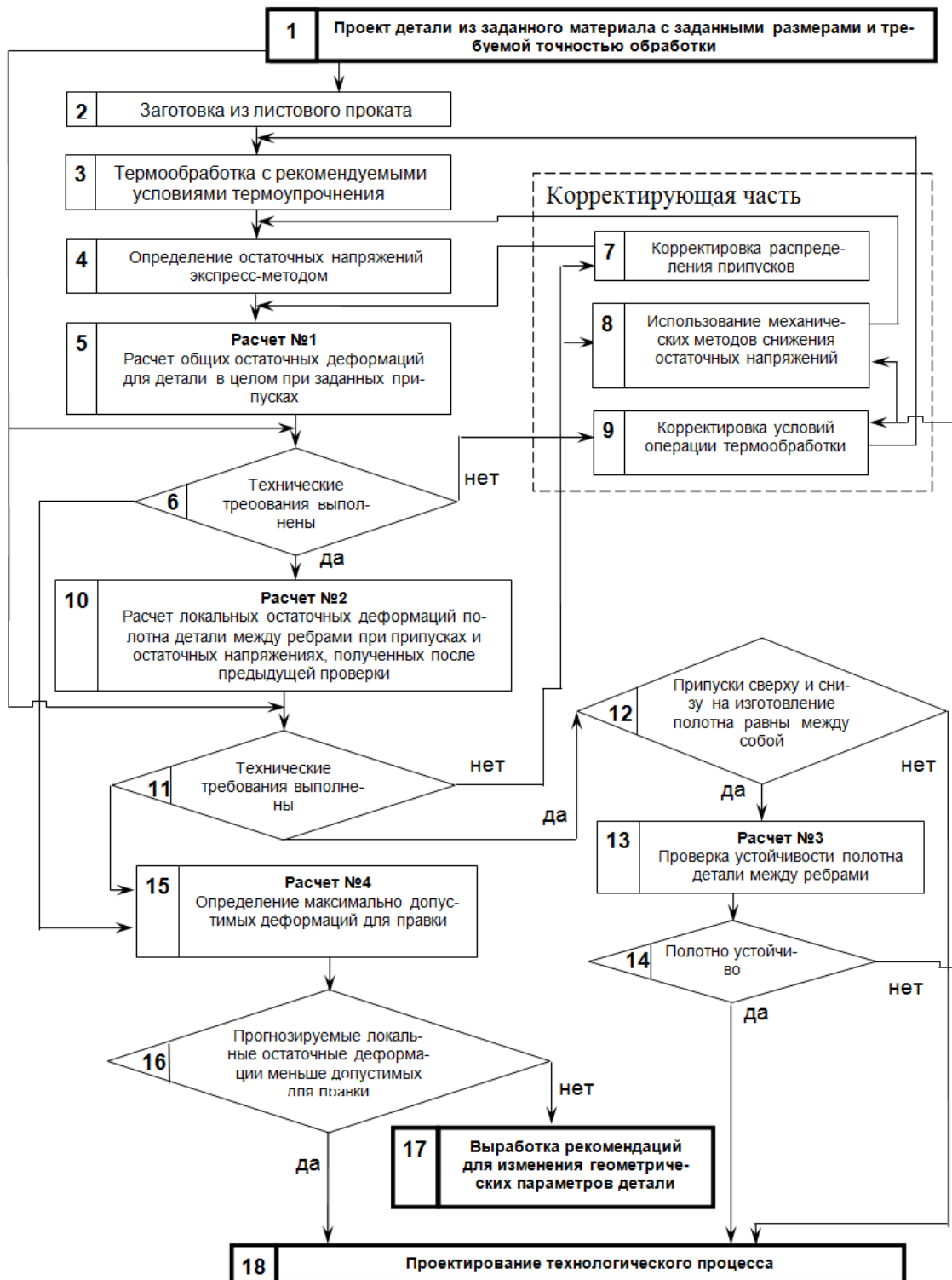


Рисунок 56 – Алгоритм минимизации термических остаточных напряжений, общих и локальных остаточных деформаций маложестких деталей
Такой подход к решению задачи по минимизации общих и локальных

остаточных деформаций значительно увеличит стоимость производства, принимая во внимание высокую стоимость заготовок. Учитывая вышесказанное, а также результаты, полученные в процессе проведенного исследования, сформированы предложения по корректировке алгоритма минимизации общих деформаций с целью снижения себестоимости процесса изготовления маложестких деталей.

В представленном алгоритме (рис. 56) для определения остаточных напряжений возникающих в процессе термической обработки предложен разрушающий экспресс-метод (А.С. №1643928 от 22.12.90), который можно заменить на систему компьютерного моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений, представленную в главе №4 данной работы. Тогда скорректированный алгоритм минимизации общих остаточных деформаций будет иметь следующий вид (рис. 57), в котором на четвертом этапе уже используется расчетный метод определения остаточных напряжений, описанный алгоритмом (рис. 15).

Для снижения уровня общих остаточных деформаций по представленному алгоритму (рис. 56) производят изменение положения детали относительно контура заготовки, с целью достижения совпадения положения полотна детали и нейтральной оси поперечного сечения заготовки.

Так же производят правку деталей, реализующую малые пластические деформации и корректировку условий термической обработки заготовок с целью снижения уровня остаточных напряжений и деформаций. Более подробно необходимо рассмотреть часть представленного алгоритма, автоматической системы проектирования технологических процессов изготовления маложестких деталей, в которой описан метод уменьшения деформаций, основанный на корректировке условий операций термического упрочнения. Исходя из представленной блок-схемы, после каждой корректировки условий термоупрочнения необходимо проводить экспериментальное определение

разрушающим экспресс-методом (А.С. №1643928).

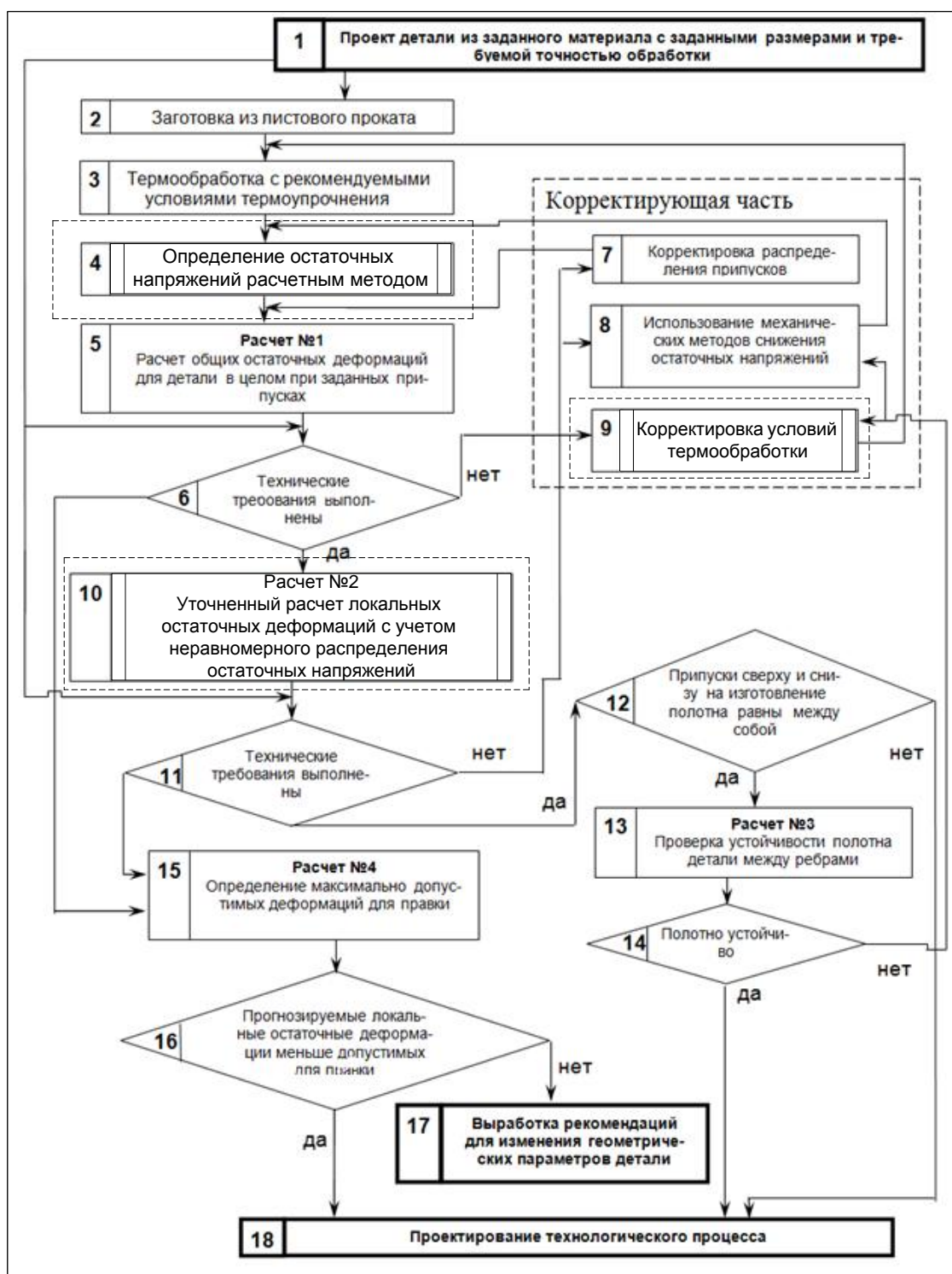


Рисунок 57 – Усовершенствованный алгоритм минимизации термических остаточных напряжений, общих и локальных остаточных деформаций малолистовых деталей

Учитывая широкую номенклатуру закалочных сред, возможность изменения температуры и химического состава водных растворов, применяемых для охлаждения при закалке, для подбора оптимальных условий термической обработки необходимо разрушить значительное количество заготовок.

Принимая во внимание высокую стоимость заготовок, процесс корректировки и подбора оптимальных условий термической обработки формирующих оптимальную картину распределения остаточных напряжений и соответственно общих и локальных остаточных деформаций, будет способствовать значительному увеличению продолжительности и себестоимости производимых изделий. Для снижения себестоимости и повышения качества производимых изделий необходим научный подход по корректировке условий термической обработки, основанный на тщательном изучении вопроса формирования тепловых полей в процессе закалки и их влияния на напряженно-деформированное состояние заготовки. Представленная в главе 2 система компьютерного моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений позволяет корректировать условия термической обработки, с целью формирования требуемой картины распределения остаточных напряжений, обеспечивающих приемлемый уровень остаточных деформаций. Тогда алгоритм (рис. 58) определения оптимальных условий термической обработки формирующей требуемый уровень остаточных напряжений и деформаций будет состоять из нескольких основных этапов.

На первом этапе производим определение коэффициента теплоотдачи при помощи устройства, представленного в главе 3 данной работы. Полученные значения коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$, характеризующего процесс конвективного теплообмена охлаждаемой заготовки и закалочной среды, используем на втором этапе представленного алгоритма для расчета в программном комплексе MSC Sinda системы нестационарных тепловых полей характеризующей изменение температуры заготовки в процессе закалки.

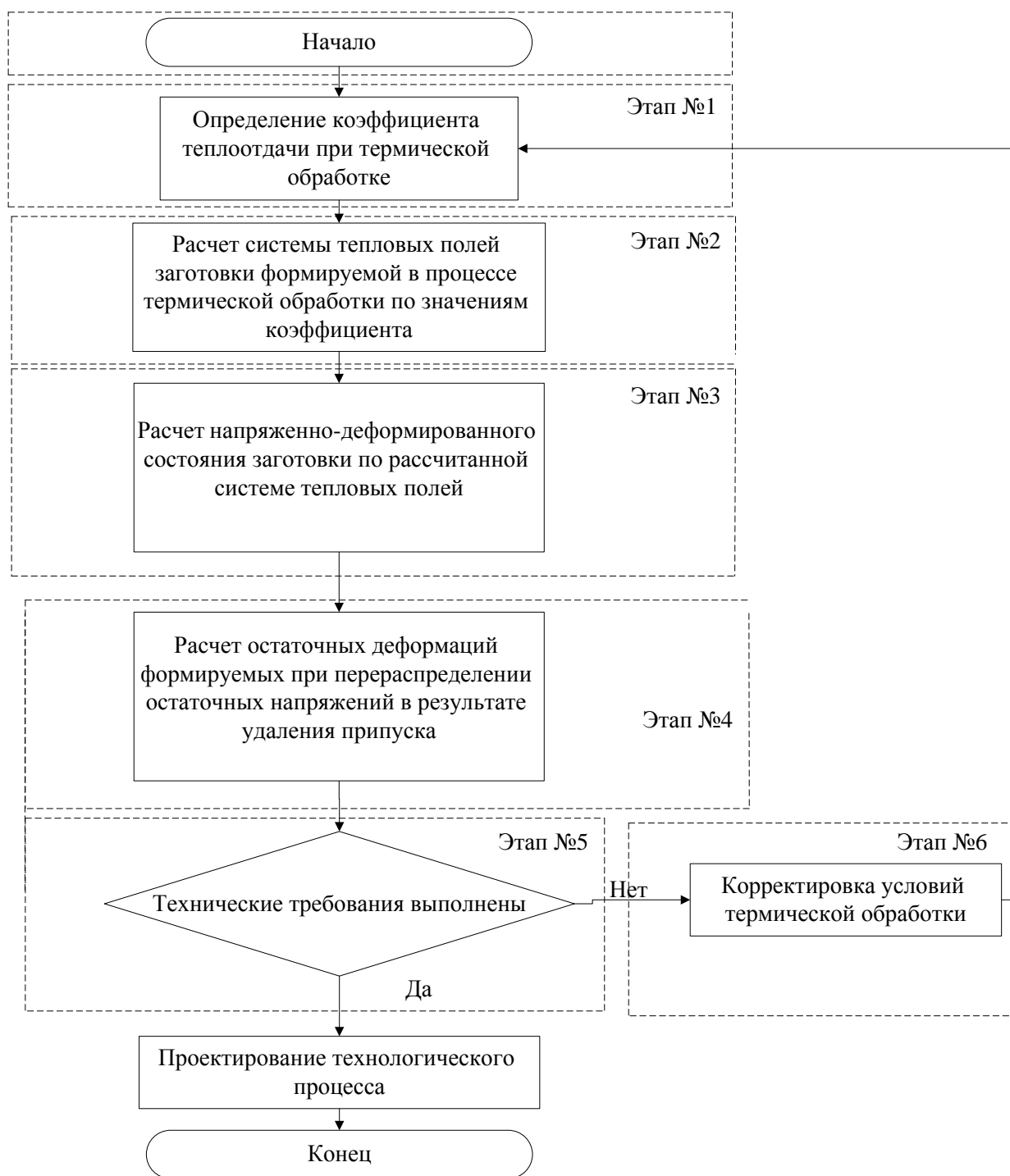


Рисунок 58 – Алгоритм корректировки условий термической обработки

На третьем этапе алгоритма, система нестационарных тепловых полей, рассчитанная в программном комплексе MSC Sinda, загружается в качестве

тепловых нагрузок в программный комплекс MSC Nastran для проведения расчета напряженно-деформированного состояния заготовки и остаточных напряжений, возникающих в процессе неравномерного охлаждения. Полученные значения остаточных напряжений на четвертом этапе алгоритма используем для расчета остаточных деформаций детали в целом, в соответствии с математической моделью (37), представленной в работе [48]. На пятом этапе производим сравнение расчетных значений остаточных деформаций с допусками на прямолинейность и неплоскостность.

$$f_x = \frac{b^2}{8EJ_x} \cdot (M_x - \mu M_x)$$

$$f_z = \frac{l^2}{8EJ_z} \cdot (M_z - \mu M_z)$$
(37)

где f_x, f_z – остаточные деформации изгиба в плоскостях ZOХ и ZOУ соответственно; l, b – габаритные размеры детали по осям Х и Z соответственно; M_x, M_z – изгибающие моменты, действующие на деталь в результате удаления припусков a_1, a_2, a_3, a_4 в направлении осей OХ и OZ соответственно; J_x, J_z – моменты инерции поперечного сечения детали в плоскостях XOУ и ZOУ.

Если расчетные значения деформаций будут в пределах допусков, то переходим к проектированию технологического процесса, если расчетные значения превышают допуски, тогда переходим к шестому этапу алгоритма. На шестом этапе производится корректировка условий термической обработки (изменение температуры и состава закалочных сред) с последующим переходом к первому этапу для определения коэффициента теплоотдачи. Корректировка условий термической обработки направлена на снижение скорости охлаждения заготовки и уровня остаточных напряжений. При корректировке следует соблюдать важный аспект, скорость охлаждения $v_{охл}$ каждой точки заготовки, должна превышать критическую скорость охлаждения $v_{кр}$ сплава, необходимый для повышения механических свойств сплава. Значения критических скоростей охлаждения для разных сплавов вычисляются по диаграммам изотермического

распада переохлажденного твердого раствора [69]. Так для сплава В95 $v_{кр}=100-120$ при толщине до 70 мм, Д16 $v_{кр}=60-90$ при толщине до 120 мм, АК4-1 $v_{кр}=10-20$ при толщине до 200 мм, В93 $v_{кр}=3-5$ при толщине до 300 мм. Поэтому основной задачей при корректировке условий термической обработки является определение такой оптимальной скорости охлаждения, которая незначительно будет превышать критическую скорость охлаждения $v_{кр}$, при этом будет обеспечивать требуемые механические свойства и снижение уровня остаточных напряжений. Определение оптимальной скорости охлаждения возможно при использовании алгоритма (рис. 58), который позволяет определять скорость охлаждения и распределение остаточных напряжений в каждой точке исследуемой заготовки расчетным методом, что снижает стоимость и продолжительность процесса.

К преимуществам данного алгоритма следует отнести возможность установления качественной логической связи между условиями термической обработки, характером изменения коэффициента теплоотдачи, системой нестационарных тепловых полей и формируемых остаточных напряжений, что обеспечит качественный подход к управлению уровнем остаточных напряжений формируемых термической обработкой. Определение системы нестационарных тепловых полей позволяет фиксировать скорость охлаждения каждой точки охлаждаемого тела, которая должна превышать критическую скорость охлаждения сплава, что является необходимым условием проведения закалки. Использование устройства определения температурозависимого коэффициента теплоотдачи, характеризующего процесс охлаждения, позволяет максимально эффективно применять прерывистую закалку, снижающую уровень остаточных напряжений [97] без снижения механических свойств материала заготовки. Также данный алгоритм позволяет определить оптимальные условия термической обработки без использования разрушающих методов контроля остаточных напряжений, что обеспечит сокращение времени и расходов на дорогостоящие

заготовки, используемые в процессе определения напряжений.

Выводы

1. По разработанным и описанным алгоритмам в главе №2, рассчитана система нестационарных тепловых полей, с использованием экспериментально полученных значений коэффициента теплоотдачи, возникающих в процессе термической обработки, а также рассчитаны значения остаточных напряжений, возникающих при термической обработке заготовок.

2. Разработанной системе компьютерного моделирования термических остаточных напряжений, представляющей собой совокупность программных комплексов: авторского программного комплекса (АС №2015617306), MSC Nastran, Marc, Sinda, связанных соответствием форматов входных и выходных данных.

3. Разработан алгоритм корректировки условий термической обработки заготовок из алюминиевых сплавов, позволяющий снижать уровень термических остаточных напряжений без снижения механических свойств материала заготовки.

4. Разработана методика минимизации общих и локальных остаточных деформаций с использованием системы компьютерного моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений, путем использования расчетного метода определения остаточных напряжений и алгоритма корректировки условий термообработки, с целью снижения себестоимости процесса минимизации деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача моделирования термических остаточных напряжений, на основе алгоритма идентификации температурозависимых параметров, имеющая значения для развития отраслей знаний, отраслей промышленности, связанных с производством маложестких деталей из заготовок и получены следующие результаты:

1. Разработана новая система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей, представляющая собой совокупность программных комплексов: авторского программного комплекса (свидетельство №2015617306), MSC Nastran, Marc, Sinda, связанных соответствием форматов входных и выходных данных. Система позволяет рассчитывать термические остаточные напряжения заготовок, используемых для производства маложестких деталей, с погрешностью не более 5%.

2. Впервые предложен универсальный алгоритм параметрической идентификации температурозависимых параметров математических моделей процесса термообработки. Определены значения коэффициента теплоотдачи, характеризующие процесс охлаждения заготовки при закалке.

3. Разработана математическая модель, представляющая собой уравнение Фурье-Кирхгофа с соответствующими начальными, граничными условиями, отличающаяся наличием экспериментальных зависимостей, характеризующих изменения температуры в процессе закалки в различных сечениях термообрабатываемой заготовки. Рассчитана система нестационарных тепловых полей, возникающих в процессе закалки заготовок.

4. Предложен алгоритм минимизации термических остаточных напряжений, разработанный на основе системы компьютерного моделирования. Алгоритм позволяет снизить уровень термических остаточных напряжений, предотвратить появление общих и локальных остаточных деформаций маложестких деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. – М.: Машиностроение, 1963. – 355 с.
2. Аксенов Г.А. Общая теория рассеяния рентгеновских лучей металлом, находящимся в линейном напряженном состоянии / Г.А. Аксенов // Прикладная физика. – 1929. – т. 6. – с. 3-45
3. Аксенов Г.А. Общая теория рассеяния рентгеновских лучей металлом, находящимся в линейном напряженном состоянии / Г.А. Аксенов // Прикладная физика. – 1929. – т. 4. – с. 627-659
4. Акуличев А.Г., Трофимов В.В. Остаточные напряжения в нитроцементованной стали 20Х3МВФ-Ш // Инженерный вестник Дона. – 2010. - №4. с. 163-169
5. Александров А.А. Прогнозирование динамики охлаждения заготовок из алюминиевых сплавов при термообработке / А.А. Александров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – №1. – с. 140-145.
6. Алюминиевые сплавы: структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 432 с.
7. Ампилогов А.Ю. Прогнозирование структуры и свойств сталей в объеме изделия при закалке и отпуске: Дисс. ... канд. техн. наук / А.Ю. Ампилогов, Москва.: - 2008. – 145 с.
8. Антонов А.А. Контроль уровня остаточных напряжений в сварных соединениях методом лазерной интерферометрии / А.А. Антонов // Сварочное производство. – 1983. - №9. с. 21-23.
9. Антонов А.А. Разработка методики и оборудования голографического контроля остаточных напряжений в сварных конструкциях / А.А. Антонов // Сварочное производство. – 1983. - №12. с. 26-28.
10. Аппен А.А. Термостойкие неорганические покрытия. – Л.: Химия, 1976. – 295 с.

11. Барахтенко Е.А. Минимизация поводок тонкостенных авиационных деталей на основе дискретного моделирования: Дисс. ... канд. техн. наук / Е.А. Барахтенко, Иркутск.: - 2010. – 177 с.
12. Барретт Ч.С. Структура металлов / Ч.С. Барретт. – М.: Металлургиздат 1948 – 387 с.
13. Бауман Э.В. Измерение сил электрическим методом // учеб. перевод с нем. / Э.В. Бауман. – М.: Мир, 1978. – 280 с.
14. 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 Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева . – 2013. - №3. – с. 123-128.
15. Бачурин А.С., Бобин К.Н., Матвеев К.А., Курлаев Н.В. Влияние закалки на остаточные деформации деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов / Вестник СибГАУ. 2013. №3. С.119-123.
16. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. - М.: Машиностроение, 1979. -360 с.
17. Биргер И.А. Остаточные напряжения / Биргер И.А. – Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 233 с.
18. Бурков П.В., Буркова С.П., Тимофеев В.Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния участка магистрального газопровода «Нижне-Квакчинское газоконденсатное месторождение – г. Петропавловск-Камчатский» методом конечных элементов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. - №5. с. 101-105
19. Бюлер Г. Полное определение остаточных напряжений в сплошных и полых металлических цилиндрах // Остаточные напряжения. Под ред. В.П. Осгуда. – М.: ИЛ, 1957. – с. 48-62.

20. Валетов В.А. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов: Учеб. пособие / В.А. Валетов, С.Д. Васильков, А.Н. Сисюков, О.С. Юльметова. – ИТМО Санкт-Петербург, 2010. – 88 с.
21. Васильев И.Е. Определение напряжений в экстремальных условиях методом хрупких тензочувствительных покрытий: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1999. – 222 с.
22. Васькин К.Я. Расчет остаточных напряжений при точении поверхности с износостойкими покрытиями / Вектор науки ТГУ. 2012. №3. С.60-65.
23. Великанов Н.А., Севастьянов Ю.М., Корышев А.И., Бучнева Р.И. Система автоматизированного контроля размеров длинномерных деталей // Авиационная промышленность. -М.: Машиностроение, 1992. -№4, -С.6-9.
24. Вишняков Д.В., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989, - 254 с.
25. Гинзбург В.М. Голография: методы. Аппаратура / под ред. В.М. Гинзбург и Б.М. Степанова. – М.: Сов. радио. -1974. – 155 с.
26. Голубев А.И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 200 с.
27. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М: Изд-во стандартов, 1984 – 28 с.
28. ГОСТ 6616–94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия – М.: Изд–во стандартов, 1998. – 15 с.
29. ГОСТ 7564-97. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний. М: Изд-во стандартов, 1997 – 16 с.
30. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. М: Изд-во стандартов, 1984 – 3 с.
31. ГОСТ Р 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования – М.: Изд–во стандартов, 2002. – 84 с.

32. Давиденков Н.Н., Шевандин Е.М. Исследование остаточных напряжений создаваемых изгибом // Журнал технической физики. – 1939. – Т.IX. – Вып. 1.
33. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г.Д. Дель – М: Машиностроение, 1971. – 247 с.
34. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Моделирование упругопластических деформаций при термосиловой обработке / Вектор науки ТГУ. 2012. №3. С.80-85.
35. Дударев В.В., Недин Р.Д. О реконструкции остаточных напряжений в твердых телах // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. - №4-4. с. 1473-1475
36. Еременко В.И., Корнеева Н.Н., Журавлев Н.Н., Пискарев В.Д., Кащеева А.В., Дашкевич Л.П. Влияние режимов закалки на механические свойства и остаточные напряжения жаропрочных никелевых сплавов типа ЭП962 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1992. - №1. – с.10-13
37. Замащиков Ю.И. Каргапольцев С.К. Экспресс-метод определения остаточных напряжений закаленных плиток // Повышение эффективности тех.процессов механической обработки: Сборник / ИПИ. - Иркутск, 1990. -С.90-96.
38. Замащиков Ю.И., Каргапольцев С.К. Математическая модель САПР-ТП бездеформационной обработки деталей типа пластин с подкреплениями // Сб. науч. тр. / ИПИ. – Иркутск, 1989. – с. 9-13.
39. Замащиков Ю.И., Промптов А.И., Ботвенко С.И., Каргапольцев С.К. А.С. Способ определения закалочных остаточных напряжений. - №1643928 от 22.12.90. –5 с.
40. Захаров В.В. Ростова Т.Д. Высокорекурные высокопрочные алюминиевые сплавы // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1997. – с. 44-49.

41. Земсков Ю. П. Материаловедение. Лабораторный практикум по дисциплине «Материаловедение» / Ю.П. Земсков, Л.Б. Лихачева, Ю.С. Ткаченко. – Воронеж: ВГТА, 2011 г. – 128 с.
42. Иванов С.И. Зона включения остаточных напряжений в полоске// Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. - Куйбышев: КуАИ, 1968. - Вып. 39. - С. 158-170.
43. Ильюшенко Е.Г., Бодарева А.С. Закалка деталей из алюминиевых сплавов в жидком азоте // Митом. – 1968. - №1. – С. 46-49.
44. Исаев А.И. Влияние технологических факторов на остаточные напряжения в поверхностном слое при точении конструкционных сталей. – М.: Машгиз, 1957. – 189 с.
45. Исаев А.И., Овсеенко А.Н. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое // Вестник машиностроения. – 1967. - №8. – с. 74-76.
46. Исякаев К.Т. Эффективный способ снижения остаточных напряжений и коробления при закалке штамповок из алюминиевых сплавов // Материаловедение и металлофизика легких сплавов: международная научная школа для молодежи. — Екатеринбург, 2010. — С. 152-154.
47. Кан С.Н. Расчет самолета на прочность / С.Н. Кан, И.А. Свердлов. – Москва: М. «Машиностроение», 1966 г. – 520 с.
48. Каргапольцев С.К. Прогнозирование остаточных деформаций при проектировании технологического процесса обработки мало жестких деталей. Дис
49. Касаткин Б.С. Напряжения и деформации при сварке // Учебник для студентов ВУЗов. – Киев: Вища школа, 1987.
50. Качанов Н.Н. Рентгеноструктурный анализ поликристаллов (практическое руководство) / Н.Н. Качанов, Л.И. Миркин. – М.: Машгиз. – 1960. – 697 с.

51. Кирпичев В.А., Иванов Д.В., Саушкин М.Н. Остаточные напряжения в образцах из сплавов В95 и Д16Т после пневмодробеструйной обработки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2009. - №2. с. 260-263
52. Ключников С.И. Минимизация остаточных деформаций методом дискретного моделирования при фрезеровании маложестких деталей. Дис..
53. Койре В.Е., Гинкул С.П. Коробление корпусов и крышек редукторов при механической обработке // Материалы I научно-технической конференции НИИПТМАШа. - Краматорск, 1970. - С.54-56.
54. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. – М: Госуд. науч. техн. изд., 1961. – 413 с.
55. Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения, деформации и трещины в отливках. – М.: Машиностроение, 1981. – 199 с.
56. Константинов М.Т. Расчет программ фрезерования на станках с ЧПУ. - М.: Машиностроение, 1985. -160 с.
57. Кочетов Н.Н., Панов Б.И., Румянцев Ю.С. Оптимизация технологических параметров производства деталей летательных аппаратов с минимальным короблением // Авиационная промышленность. – 1992, - №11-12, - с. 16-19.
58. Кравченко Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке: Учебное пособие / Б.А. Кравченко. – Куйбышев: КПТИ, 1981, С. 90.
59. Кравченко И.Н., Сельдяков В.В., Бобряшов В.М., Пузряков А.Ф. Математическое моделирование процесса развития остаточных напряжений при формировании плазменных покрытий / Технические науки. 2013. №11. С.77-80.
60. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

61. Кутайцева Е.И., Сенаторова О.Г. и др. Влияние охлаждающей среды при закалке на свойства и остаточные напряжения в штамповках сплава В96 // *Металловедение и технология легких сплавов.* – М: Наука, 1976. – с. 73-76.
62. Ларченко А.Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием при производстве и эксплуатации изделий из полимерных материалов: Дисс. ... канд. техн. наук / А. Г. Ларченко, Иркутск.: – 2014. – 164 с.
63. Лебский С.Л., Лебский Д.С. Влияние параметров технологического процесса дробенаклепа на эпюру остаточных напряжений / *Известия ВолгГТУ.* 2013. №15. С. 61-64.
64. Летуновский А.П., Антонов А.А., Стеклов О.И. Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2012. - №8. с. 18-24.
65. Лившиц А. В. Прогнозирование локальных остаточных деформаций при проектировании технологического процесса изготовления мало жестких деталей: Дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Лившиц. – Иркутск: - 1999. – 185 с.
66. Мазеин П.Г., Прусаков Д.В., Цунин А.В. Моделирование остаточных напряжений и деформаций, возникающих при дорновании / *Известия Челябинского научного центра,* 200. №1. С. 47-50.
67. Макеев С.А., Колмаков Д.М. Моделирование остаточных напряжений в тонкостенном прокате трапециевидного сечения / *Омский научный вестник – Машиностроение и машиноведение.* 2014. №1 (127). с. 69-74.
68. Махутов Н.А. Применение хрупких тензочувствительных покрытий для исследования напряженно-деформированного состояния тройника магистрального нефтепровода / Н.А. Махутов, Ю.В. Лисин, Б.Н. Ушаков, Е.С. Васин, И.Е. Васильев // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2010. - №5. – с. 42-48.

69. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов // Г.А. Меркулова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. – 312 с.
70. Металловедение алюминия и его сплавов. Справоч. – М: Metallургия, 1983. – 280 с.
71. Металловедение алюминия и его сплавов. Справоч. -М: Metallургия, 1983. -280 с.
72. Методические материалы НИАТ ММ 1.4.1460-85. Проектирование технологических процессов фрезерной обработки на станках с ЧПУ с минимальной деформацией.
73. Мирзаев Д.А., Шабуров А.Д., Чернявский А.О. Анализ термоупругих напряжений в поковках с учетом эффекта релаксации / Вестник ЮУрГУ. Серия Metallургия. 2014. №3. С. 40-48
74. Настека В.В., Коренякин А.Ф., Низамов Н.Ф., Чирков Е.Ю., Кушнарченко В.М., Каменев С.В. Напряженно-деформированное состояние металла корпусов фонтанной арматуры до и после наплавки // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. - №1. с. 212-218
75. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках // Центр. Бюро нормативов по труду при НИИ труда. – Изд. 3-е. – М.: НИИ труда, 1978. – 247 с.
76. Овсеенко Е.С., Овсеенко А.Н., Ягуткин Е.Г. Методы определения технологических остаточных напряжений в деталях малой жесткости / Е.С. Овсеенко, А.Н. Овсеенко, Е.Г. Ягуткин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. - №S4-6. – с. 29-32.
77. *Оден, Дж.* Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред [Текст] / Дж. Оден. М.: Мир, 1976
78. Одинокоев Ю.Г. Расчет самолета на прочность / Ю.Г. Одинокоев. – Москва: М. «Машиностроение», 1973 г. – 392 с.

79. Патент 1044149 (Российская Федерация), МПК G01K17/20, F01D5/18. Способ определения коэффициента теплоотдачи от поверхности конвективно охлаждаемых элементов / В. М. Сапожников, Г.П. Нагога; В. М. Сапожников, Г.П. Нагога. – 3413826/06, заявл. 31.03.1982; опубл. 10.12.2005.

80. Патент 146542 (СССР), МПК H05B3/00. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи / Е. Л. Суханов, Д. В. Будрин; заявл. 06.06.1961; 1962, Бюл. № 8.

81. Патент 1559860 (Российская Федерация), МПК G01K17/20. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи / Э. А. Болтенко, О.А. Судницын; Э. А. Болтенко, О.А. Судницын. – 4389540/10, заявл. 09.03.1988; опубл. 27.05.1997.

82. Патент 2001131534 (Российская Федерация), МПК G01M15/00. Способ определения коэффициента теплоотдачи твердых тел / В.А. Калинин, В.И. Курепин, Р.Ф. Новоселов; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики при Ростовском государственном университете – 93042904/25, заявл. 27.08.1993; опубл. 20.12.1995.

83. Патент 2008635 (Российская Федерация), МПК G01K17/20. Датчик теплового потока / А.Е. Александров, А.Г. Галянов, Д.Г. Русев, Б.А. Прусаков – 4632035/10, заявл. 09.01.1989; опубл. 28.02.1994, Бюл. № 4 – 140 с.

84. Патент 2039092 (Российская Федерация), МПК C21D1/54, C21D1/56, C21D1/60. Способ определения охлаждающей способности жидкой среды и устройство для его осуществления / Э.Л. Аэро, В.С. Анисимов, В.И. Алешин, Е.Л. Гюлиханданов; заявитель и патентообладатель Институт высокомолекулярных соединений РАН – 4844918/02, заявл. 11.04.1990; опубл. 09.07.1995, Бюл. № 4 – 140 с.

85. Патент 2198769 (Российская Федерация), МПК B23C3/00. Способ обработки плоских поверхностей нежестких заготовок / М.Г. Гольдшмидт;

заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. - №2001112724/02; заявл. 08.05.2001; опубл. 20.02.2003.

86. Патент 93042904 (Российская Федерация), МПК G01N25/18. Способ определения коэффициента теплоотдачи / М. Н. Жорник ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение "Сатурн". – 2001131534/06, заявл. 21.11.2001; опубл. 27.06.2003,

87. Перельмутер А.В. Беседы о строительной механике. Научное издание / А.В. Перельмутер. – М.: Издательство SCAD Soft, издательство ассоциации строительных вузов, 2014. – 250 с.

88. Покровский А.М. Расчет остаточных напряжений в биметаллических опорных прокатных валках после термической обработки / А.М. Покровский // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 6.

89. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.

90. Применение алюминиевых сплавов: Справ. изд. / Альман М.Б., Андреев Г.Н., Арбузов Ю.П. и др. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.

91. Производственная инструкция НИАТ ПИ-234. Формообразование и правка деталей из алюминиевых сплавов после механической обработки.

92. Промптов А.И. Оптимизация режима резания при фрезеровании маложестких деталей // Технология машиностроения и вопросы прочности: Сборник / ТПИ. – Томск, 1977. – с. 46-50.

93. Промптов А.И., Ботвенко С.И. Причины возникновения и возможные пути управления неустойчивым состоянием полотна при изготовлении деталей коробчатой формы // Управление технологическими процессами в машиностроении / Сб. научных трудов / ИПИ. – Иркутск, 1989. – с. 3-9.

94. Пыхалов А.А. Математические модели в инженерных приложениях / Пыхалов А.А., Кудрявцев А.А. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. – 184 с.

95. Радченко В.П. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях / В.П. Радченко, М.Н. Саушкин. М.: Машиностроение-1. 2005.

96. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрических элементов конструкции при ползучести Известия ВУЗов. Машиностроение. 2004. №11. С. 3-17

97. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.

98. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Расчет релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрического изделия в условиях ползучести // Вестн. Сам. гос. техн. университета. Сер. Физ.-мат. науки. 2001. №12. С.61-73.

99. Редакция журнала. Усилитель сигнала термопары с компенсацией напряжения на опорном спаяе / Редакция журнала // Схемотехника – 2000. – Вып. 1. – с. 18.

100. Рожков И.И. Мыльников В.В. Расчет Внутренних остаточных напряжений, возникающих в закаленных деталях машин после химико-термической обработки / И.И. Рожков, В.В. Мыльников // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №1. с. 114-119.

101. Румянцев, А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности [Текст]: Учебное пособие / А.В. Румянцев. Калинингр. Ун-т. Калининград, 1995. – 170 с.

102. Румянцев, А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности [Текст]: Учебное пособие / А.В. Румянцев. Изд. 3-е, перераб. – Российский гос-университет им. И. Канта. – Калининград. 2010. – 95 с.

103. Саакиян Л.С. Защита нефтепромыслового оборудования от коррозии: Справочник рабочего / Саакиян Л.С., Ефремов А.П., Соболева И.А. Глазов Н.П., Светличкин А.Ф. – М.: Недра, 1985, 206 с.

104. Салин А.Н., Ушаков Б.Н., Степанов Н.А., Косенко А.И. Определение деформаций и напряжений в натуральных авиационных конструкциях методом нанесения хрупких тензочувствительных покрытий // Авиационная промышленность. – М.: Машиностроение, 1993. - №5-6. – с. 10-11.

105. Сапожников С.Б., Загребельный С.С., Шакиров А.А. Релаксация сварочных напряжений при помощи глубокого пластического деформирования / Вестник ЮУрГУ . Серия: Машиностроение. 2013. №2. С. 81-86.

106. Саушкин М.Н., Радченко В.П. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения / Прикладная механика и теоретическая физика. 2011. №2. С. 173-182

107. Севастьянов В.П. Экспериментальное исследование осевых остаточных напряжений при торцевом фрезеровании ст.45 // Изв. вузов. Сер. «Машиностроение». -1960, -№1. -С.34-36.

108. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлин.,– М.: Мир. - 1979. – 392 с.

109. Семенов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В. Напряженно-деформированное состояние процесса разделения листовых алюминиевых заготовок эластичным рабочим инструментом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. - №3. с. 34-46

110. Семенов К.О., Расторгуев Д.А. Этапы термосиловой обработки мало жестких длинномерных деталей / Технические науки – от теории к практике. 2015. №1. С. 40-48.

111. Соловье В.П. Организация эксперимента [Текст] / В. П. Соловьев, Е.М. Богатов – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2013. – 255 с.

112. Стандарт СТ ЦКБА 010-2004. Арматура трубопроводная. Поковки, штамповки и заготовки из проката. – М.: Изд. Технический комитет по стандартизации «Трубопроводная арматура», 2011 – 36 с.

113. Старков В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ. -М.: Машиностроение, 1984. -119 с.

114. Стебиков В.И. Остаточные напряжения при механической обработке жаропрочного сплава ЭП 437Б // Производительность и качество при обработке жаропрочных и титановых сплавов. - Куйбышев: КуАИ, 1967. -С.36-38.

115. Сургутанова Ю.Н. Закономерности формирования остаточных напряжений в неоднородном поверхностном слое: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 /СГАУ. – Самара, - 16 с.

116. Тарасов Ю.Л. Расчет на прочность элементов конструкции самолета / Ю.Л. Тарасов, Б.А. Лавров. – Самара: СГАУ, 2000 г. – 112 с.

117. Трещев А.А., Петров А.А., Теличко В.Г. Напряженно-деформированное состояние тонких прямоугольных пластин из разносопротивляющихся материалов в условиях термосилового нагружения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2008. - №1. с. 110-118

118. Филимонов И.Е, Гордич А.Г. Прокудин П.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенных корпусных деталей с учетом литейных дефектов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2011. - №31. с. 44-48

119. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 544 с., ил.

120. Шимановский А.О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики / А.О. Шимановский, А.В. Путято., – М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 61 с.

121. ASTM E837-08e1 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. – ASTM Headquarters. – 2008. p. 17.

122. Desvignes M. Fatigue progressing of shot peened steel residual stresses / M. Desvignes, B. Gentil, L. Castex // Sci. and Technol. Int. Conf. Vol. 1. – Oberwisel et al.: 1987. – Pp. 441-448.

123. F. D. FISCHER. The influence of different geometrical and thermal boundary conditions and the phase transformation on the residual stress state in railroad rails after heat-treatment / F. D. FISCHER, E. HINTEREGGER, F. G. RAMMERSTORFER // International conference on residual stresses 7–9 october, 2012 – Garmisch-Partenkirchen, Germany. – 1989. – C.467–473.

124. Gabor D.A. New microscopy principle / Gabor D.A. // - Nature. 1948. 161 c.

125. ISO 9950:1995(E). Industrial quenching oils – Determination of cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method. – Committee of Standards, 1995. – 9 p.

126. MSC Nastran. MD Nastran 2006 Release Guide [Текст] // MSC Software, 2006 - P. 276.

127. MSC Nastran. Nastran 2013.1 Implicit Nonlinear (SOL 600) User's Guide [Текст] // MSC Software, 2013 - P. 536.

Электронные ресурсы:

128. MSC Nastran – Расчет и оптимизация конструкций [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.mscsoftware.ru/products/msc-nastran>.

129. MSC Sinda – комплекс программных продуктов для решения тепловых задач [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.mscsoftware.ru/products/sinda>.

130. Атрибуты конечных элементов и построение сетки [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://mylektsii.ru/2-67109.html>

131. Классификация закалочных сред // Сайт лаборатории проблем закалки кафедры МТ-8 Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. – Режим доступа: <http://zakalka.bmstu.ru/zak1.htm>

132. Методы предупреждения и уменьшения остаточных напряжений // Сайт по металлургии. – Режим доступа: <http://metal-archive.ru/obrabotka-cvetnyh-metallov/604-metody-preduprezhdeniya-i-umensheniya-ostatochnyh-napryazheniy.html>

133. Научная электронная библиотека «КИБЕРЛЕНИНКА» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/>

134. Национальная библиотека Украины им. Вернадского [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.nbuv.gov.ua/>

135. Основная профессиональная образовательная программа послевузовского профессионального образования (аспирантура) 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.ssau.ru/files/science/kadr/a_d/modules/module_01_02_06.pdf

136. Полезные и опасные остаточные напряжения [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/10_02/STRAINS.HTM

137. Теплообмен при кипении // Тепломассообмен в энергетических установках. – Режим доступа: http://twf.mpei.ac.ru/solodov/НМТ-eBook_2009/НМТ_E-Book/E-book/Chapt_18_Pool_Boiling.pdf

**Листинг программы регистрации
аналоговых данных по 6 каналам ПЛК Ардуино**

```

char tab = '\t'; // или '\t' - [Tab] символ-разделитель значений

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // можно изменять при необходимости
}

void loop()
{
  float val; // float можно вставить вместо int тогда будет отображаться с
плавающей запятой будет значение
  int ch; // номер канала для справок digitalWrite(14, HIGH); // включить
резистор на выводе аналогового входа 0
  digitalWrite(0, HIGH);

  for (ch=0; ch<=4; ch++){ // Цикл по 5-ти аналоговым входам от 0 до 4 (последний
будет вне цикла)
    val = analogRead( ch ); // Считываем входное значение
    // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):
    val = val*5;
    Serial.print( val ); // Отправляем значение
    Serial.print( tab ); // Отправляем символ-разделитель
  }
}

```

```
val = analogRead( ch ); // Считываем входное значение последнего канала
// Convert the analog reading (which goes from 0 - 102) to a voltage (0 - 5V):
val = val * 5.000;
Serial.println( val ); // Отправляем значение с завершением строки \n
delay(10); // задержка
}
```

**Листинг программного комплекса моделирования процесса нагрева
(охлаждения) при термической обработке**

```
//-----  
#include <vcl.h>  
#pragma hdrstop  
#include <fstream.h>  
#include "Unit1.h"  
#include "Unit2.h"  
#include "Unit3.h"  
#include "Unit4.h"  
#include "Unit5.h"  
#include "Unit6.h"  
#include "Unit7.h"  
#include "Unit8.h"  
#include "Unit9.h"  
#include "Unit10.h"  
#include <comobj.hpp>  
#include <math.hpp>  
#include <math.h>  
#include <office_xp.h>  
#pragma package(smart_init)  
  
//-----
```

```

#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;
extern float C[50];
extern float LB[50];
float ost,yfloat,yyfloat, lambda,h,delta_x,delta_t,kapa1,kapa2 ,p, To,T1,T2, t_end;
float alfa[6002],T[8002][502],beta[6002],X[1000],Y[1000],YY[1000];
float ai,bi,ci,fi,a,c;
int d_t, N_V ,N,N_VV ,i, n, k,l,m,j,z,y,yy,STOP;
float tochn;
AnsiString str="";
//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----
void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
STOP=0;
Memo2->Clear();
Memo4->Clear();
Memo7->Clear();
Memo9->Clear();
Memo10->Clear();
Memo11->Clear();
Memo12->Clear();
Memo5->Clear();
}

```



```

Memo3->Clear();
Memo8->Clear();
Memo13->Clear();
Memo14->Clear();
Memo15->Clear();
kapa1=StrToFloat(Edit11->Text) ;
kapa2=StrToFloat(Edit12->Text) ;
h=StrToFloat(Edit1->Text)+0.01-0.0099999991059303;
p=StrToFloat(Edit3->Text);
To=StrToFloat(Edit4->Text);
T1=StrToFloat(Edit9->Text);
T2=StrToFloat(Edit10->Text);
tochn=StrToFloat(Edit23->Text);
t_end=StrToFloat(Edit5->Text);
delta_t=StrToFloat(Edit6->Text);
delta_x=StrToFloat(Edit7->Text);
d_t=abs(t_end/delta_t)+2;
lambda=StrToFloat(Edit2->Text);
c=StrToFloat(Edit16->Text);
a=lambda/(p*c);
N_V=StrToFloat(Edit24->Text);
ost=abs(h/delta_x);
N=ost+2;
N_VV=N/N_V ;
Edit8->Text=N;
Memo2->Lines->Add("2.Отредактируйте координаты,заполните температуру в
"+FloatToStrF(d_t,ffFixed,8,0)+" значений, в узлах,при необходимости,и поставте
галочку");

```

```

Memo2->Lines->Add("и выполните основной расчёт");
for (n=0;n<=d_t;n++)
for(i=1;i<=N;i++)
{
    T[i][n]=To;
}
    m=0;
    for (i=1; i<=N; i=i+N_VV){
        str=FloatToStrF(i*delta_x*1000-1,ffFixed,8,0);
            m++;
            X[m]=i*delta_x*1000;
Memo8->Lines->Add(str);
        }
    }
//-----
void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
for(m=1;m<=N_V+1;m++)
{
    X[m]=StrToFloat(Memo8->Lines->Strings[m-1]);
}
Form2->Memo12->Clear();
Form2->Show();
for (k=0; k<=0; k++)
{
    str = "MM\t\t";
    for (l=1; l<=N_V+1; l++){
        str+=FloatToStrF(X[l],ffFixed,8,1)+"\t\t";
    }
}
}

```

```

    }
    Form2->Memo12->Lines->Add(str);
    }
for (k=0; k<=d_t; k++)
{
    str = "t="+FloatToStrF(k*delta_t,ffFixed,3,2)+" сек:\t";
    for (l=1; l<=N_V+1; l++){
        if(X[l]==0)
            {j=1;}
        else{j=abs(X[l]/1000/delta_x)+2;}
            str+=FloatToStrF(T[j][k],ffFixed,6,4)+"\t\t";
        }
    Form2->Memo12->Lines->Add(str);
    }
}
//-----
void __fastcall TForm1::Button3Click(TObject *Sender)
{
if(CheckBox1->Checked)
{
yfloat=abs(StrToFloat(Edit17->Text)/1000/delta_x);
yyfloat=abs(StrToFloat(Edit13->Text)/1000/delta_x);
y=yfloat+2;
yy=yyfloat+2;
for(m=0;m<=d_t;m++)
{
    Y[m]=StrToFloat(Memo6->Lines->Strings[m]);
}
}
}

```

```

for(m=0;m<=d_t;m++)
{
  YY[m]=StrToFloat(Memo1->Lines->Strings[m]);
}
if(CheckBox3->Checked)
{
  for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
  if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m])           &&
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m+1]))
  {
    lambda=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo4->Lines-
>Strings[m]))*LB[m]+StrToFloat(Form7->Memo3->Lines->Strings[m]);
  }
}
  for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
  if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m])           &&
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m+1]))
  {
    c=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo2->Lines-
>Strings[m]))*C[m]+StrToFloat(Form7->Memo1->Lines->Strings[m]);
  }
}
  a=lambda/(p*c);
}
for(n=1;n<=d_t;n++)
{
  if(STOP==1) break;
  str=FloatToStrF(n*delta_t,ffFixed,4,2);

```

```

Memo7->Lines->Add(str);
do
{
    Application->ProcessMessages();
    if(STOP==1) break;
    alfa[1]=(2.0*a*delta_t*lambda)/(lambda*pow(delta_x,2)+2.0*a*delta_t*(lambda+delta
_x*kapa1));
    beta[1]=(lambda*pow(delta_x,2)*T[1][n-
1]+2.0*a*delta_t*kapa1*delta_x*T1)/(2.0*a*delta_t*(lambda+kapa1*delta_x)+lambda
*pow(delta_x,2));
    for(i=2;i<=N-1;i++)
    {
//----
        ai=lambda/pow(delta_x,2);
        bi=2.0*lambda/pow(delta_x,2)+p*c/delta_t;
        ci=lambda/pow(delta_x,2);
        fi=(-p*c/delta_t)*T[i][n-1];
//----
        alfa[i]=ai/(bi-ci*alfa[i-1]);
        beta[i]=(ci*beta[i-1]-fi)/(bi-ci*alfa[i-1]);
    }
    if(CheckBox2->Checked) {
        Memo5->Clear();
        Memo11->Clear();
        Memo3->Clear();
        Memo13->Clear();
        Memo5->Lines->Add(FloatToStr(kapa1));
        Memo11->Lines->Add(FloatToStr(kapa2));
    }
}

```

```

Memo3->Lines->Add(T[y][n]);
Memo13->Lines->Add(T[yy][n]);
}
T[N][n]=(lambda*pow(delta_x,2)*T[N][n-1]+2.0*a*delta_t*(lambda*beta[N-
1]+kapa2*delta_x*T2))/(lambda*pow(delta_x,2)+2.0*a*delta_t*(lambda*(1-alfa[N-
1])+kapa2*delta_x));
for(i=N-1;i>=1;i--)
{
T[i][n]=alfa[i]*T[i+1][n]+beta[i];
}
if(T[y][n]>Y[n])
{
kapa1=kapa1+1;
}
if(T[y][n]<Y[n])
{
kapa1=kapa1-1;
}
if(T[yy][n]>YY[n])
{kapa2=kapa2+1;}
if(T[yy][n]<YY[n])
{kapa2=kapa2-1;}
} while( fabs(T[y][n]-Y[n]<tochn) && fabs(T[yy][n]-YY[n])<tochn?false:true);
//-----
DecimalSeparator = '.';
str=FloatToStrF(c,ffFixed,5,1);
Memo14->Lines->Add(str);
DecimalSeparator = '.';

```

```

str=FloatToStrF(lambda,ffFixed,5,2);
Memo15->Lines->Add(str);
//-----
if(CheckBox3->Checked)
{
for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m])           &&
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m+1]))
{
lambda=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo4->Lines-
>Strings[m]))*LB[m]+StrToFloat(Form7->Memo3->Lines->Strings[m]);
}
}
for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m])           &&
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m+1]))
{
c=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo2->Lines-
>Strings[m]))*C[m]+StrToFloat(Form7->Memo1->Lines->Strings[m]);
}
}
a=lambda/(p*c);
}
//-----
Memo9->Lines->Add(kapa1);
Memo10->Lines->Add(kapa2);
str=FloatToStrF(T[y][n],ffFixed,7,5);
Memo12->Lines->Add(str);

```

```

str=FloatToStrF(T[yy][n],ffFixed,7,5);
Memo4->Lines->Add(str);
DecimalSeparator = '.';
str=FloatToStrF(T[y][n],ffFixed,7,5)+", "+kapa1;
    Form7->Memo5->Lines->Add(str);
    kapa1=StrToFloat(Edit11->Text) ;
    kapa2=StrToFloat(Edit12->Text) ;
    DecimalSeparator = ',';
}
}
else{
if(CheckBox4->Checked){
    kapa1=StrToFloat(Memo9->Lines->Strings[n-1]);
    kapa2=StrToFloat(Memo10->Lines->Strings[n-1]);
}
if(CheckBox3->Checked)
{
for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m])
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m+1]))
{
lambda=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo4->Lines-
>Strings[m]))*LB[m]+StrToFloat(Form7->Memo3->Lines->Strings[m]);
}
}
for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m])
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m+1]))

```



```

{
c=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo2->Lines-
>Strings[m]))*C[m]+StrToFloat(Form7->Memo1->Lines->Strings[m]);
}
}
a=lambda/(p*c);
}
for(n=1;n<=d_t;n++)
{
alfa[1]=(2.0*a*delta_t*lambda)/(lambda*pow(delta_x,2)+2.0*a*delta_t*(lambda+delta
_x*kapa1));
beta[1]=(lambda*pow(delta_x,2)*T[1][n-
1]+2.0*a*delta_t*kapa1*delta_x*T1)/(2.0*a*delta_t*(lambda+kapa1*delta_x)+lambda
*pow(delta_x,2));
for(i=2;i<=N-1;i++)
{
ai=lambda/pow(delta_x,2);
bi=2.0*lambda/pow(delta_x,2)+p*c/delta_t;
ci=lambda/pow(delta_x,2);
fi=(-p*c/delta_t)*T[i][n-1];
alfa[i]=ai/(bi-ci*alfa[i-1]);
beta[i]=(ci*beta[i-1]-fi)/(bi-ci*alfa[i-1]);
}
T[N][n]=(lambda*pow(delta_x,2)*T[N][n-1]+2.0*a*delta_t*(lambda*beta[N-
1]+kapa2*delta_x*T2))/(lambda*pow(delta_x,2)+2.0*a*delta_t*(lambda*(1-alfa[N-
1])+kapa2*delta_x));
for(i=N-1;i>=1;i--)
{

```

```

    T[i][n]=alfa[i]*T[i+1][n]+beta[i];
}
if(CheckBox3->Checked)
{
for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m])           &&
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo4->Lines->Strings[m+1]))
{
lambda=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo4->Lines-
>Strings[m]))*LB[m]+StrToFloat(Form7->Memo3->Lines->Strings[m]);
}
}
for(m=0;m<=IntToStr(Form7->Memo1->Lines->Count-2);m++){
if(T[y][n]>=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m])           &&
T[y][n]<=StrToFloat(Form7->Memo2->Lines->Strings[m+1]))
{
c=(T[y][n]-StrToFloat(Form7->Memo2->Lines-
>Strings[m]))*C[m]+StrToFloat(Form7->Memo1->Lines->Strings[m]);
}
}
a=lambda/(p*c);
}
DecimalSeparator = '.';
str=FloatToStrF(c,ffFixed,5,1);
Memo14->Lines->Add(str);
DecimalSeparator = '.';
str=FloatToStrF(lambda,ffFixed,5,2);
Memo15->Lines->Add(str);

```

```

    DecimalSeparator = ',';
}
}
}
//-----
void __fastcall TForm1::Button4Click(TObject *Sender)
{
    STOP=1;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button5Click(TObject *Sender)
{
    Form3->Show();
}
void __fastcall TForm1::Button6Click(TObject *Sender)
{
    Form4->Show();
}
void __fastcall TForm1::Button7Click(TObject *Sender)
{
    Form5->Show();
}
void __fastcall TForm1::Button8Click(TObject *Sender)
{
    Form6->Show();
}
//-----

```

```
void __fastcall TForm1::Button9Click(TObject *Sender)
{
    Form7->Show();
}
//-----
```

```
void __fastcall TForm1::Button10Click(TObject *Sender)
{
    Form8->Show();
}
//-----
```

```
void __fastcall TForm1::Button11Click(TObject *Sender)
{
    Form9->Show();
}
//-----
```

```
void __fastcall TForm1::Button12Click(TObject *Sender)
{
    Form10->Show();
}
//-----
```

Инструкция по использованию программного обеспечения для расчета значений температурнозависимого коэффициента теплоотдачи

Запустим программу на рабочем столе.

Далее открывается окно программы «Расчёт коэффициента теплоотдачи», представлено на рисунке Б.1

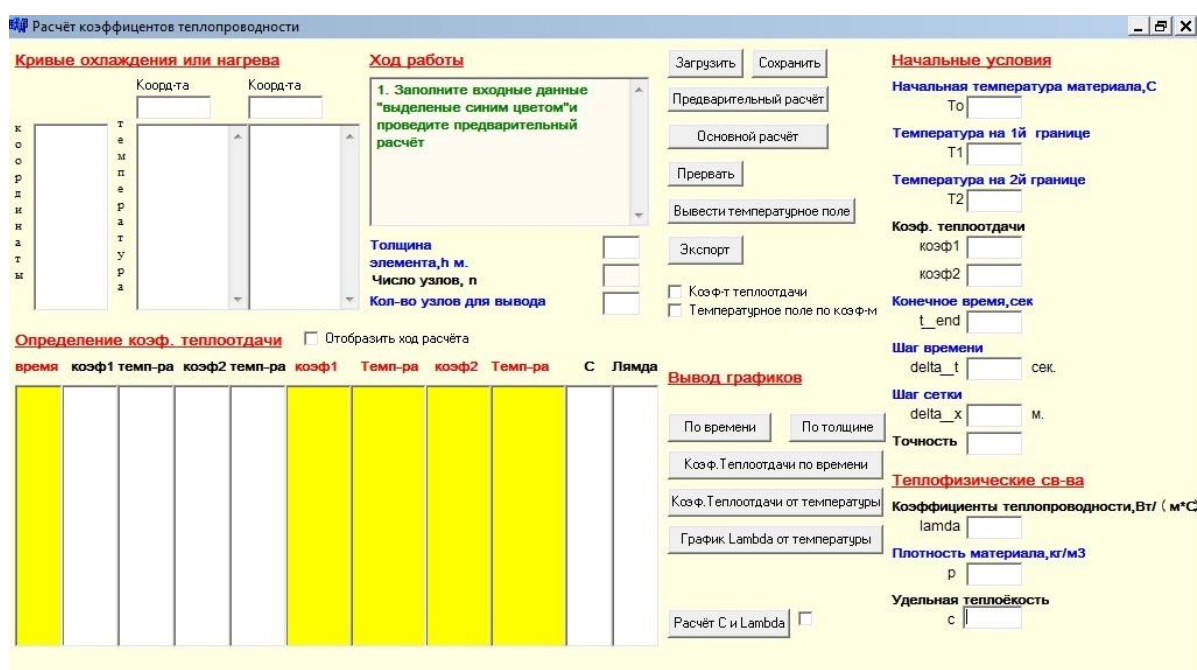


Рисунок Б.1 – Окно программы

Программу можно разделить на следующие области, указанные в таблице 5.

Таблица Б.1 – Основные окна программы

Название	Описание
1	2
Начальные условия	Начальные условия, такие как предварительное значение коэффициента, начальные и граничные

	условия
Теплофизические свойства	Теплоёмкость, теплопроводность и плотность

Продолжение таблицы Б.1

1	2
Ход работ	Отображает ход работы, подсказки пользователю
Кривые охлаждения или нагрева	Окно для заполнения температурой кривых охлаждения, и координаты по толщине с которой они были сняты
Определение коэффициента теплоотдачи	Отображает ход расчёта коэффициента и температурнозависимых теплофизических свойств
Вывод графиков	Варианты вывода графиков

Под окном ход работы, находятся окошки для входных значений толщины заготовки, вывода количества узлов на экран. Основные кнопки программы представлены в таблице Б.2.

Таблица Б.2 – Кнопки программы

Название	Описание
1	2
Предварительный расчет	После заполнения необходимых значений производится предварительный расчёт при котором определяется количество узлов, и заполняется массив начальной температуры

Основной расчёт	Производится расчёт температурного поля или коэффициента теплоотдачи
Вывести массив значений	Вывод в табличном виде значений температуры
Экспорт	Экспорт в Excel в формате для MSC Sinda
Расчёт C и Lambda	Аппроксимация значений температурнозависимых свойств

Ход работы в программе

Сначала необходимо заполнить, поле для ввода размера толщины заготовки и поле «кол-во узлов для вывода». Находится под окном «Ход работы», представлено на рисунке Б.2.



Рисунок Б.2 – Поля для заполнения

Следующим шагом идёт заполнение начальных условий, рисунок Б.3. Для учета температурнозависимых теплофизических свойств, поля необходимо заполнить начальными значениями из таблицы 7 и таблицы 8, и открыть окно расчёта C и Lambda, рисунок Б.4.

Начальные условия

Начальная температура материала, С
 T_0

Температура на 1й границе
 T_1

Температура на 2й границе
 T_2

Кэф. теплоотдачи
 коэф1
 коэф2

Конечное время, сек
 t_{end}

Шаг времени
 Δt сек.

Шаг сетки
 Δx м.

Точность

Теплофизические св-ва

Коэффициенты теплопроводности, Вт/ (м²С)
 λ

Плотность материала, кг/м³
 ρ

Удельная теплоёмкость
 c

Рисунок Б.3 – Окно «Начальные условия»

Это окно, изображенное на рисунке Б.4, заполняется значениями, которые для В95 представлены в таблице Б.3.

Таблица Б.3 – Удельная теплоемкость сплава В95

кДж/кг*град	Градус Цельсия
1	2
920	20
922	100
1000	200

1	2
1050	300
1090	400
1110	500

Теплопроводность представлена в таблице Б.4.

Таблица Б.4 – Теплопроводность сплава В95

Вт/м*град	Градус Цельсия
1	2
155	25
159	100
163	200
163	300
159	400
155	500

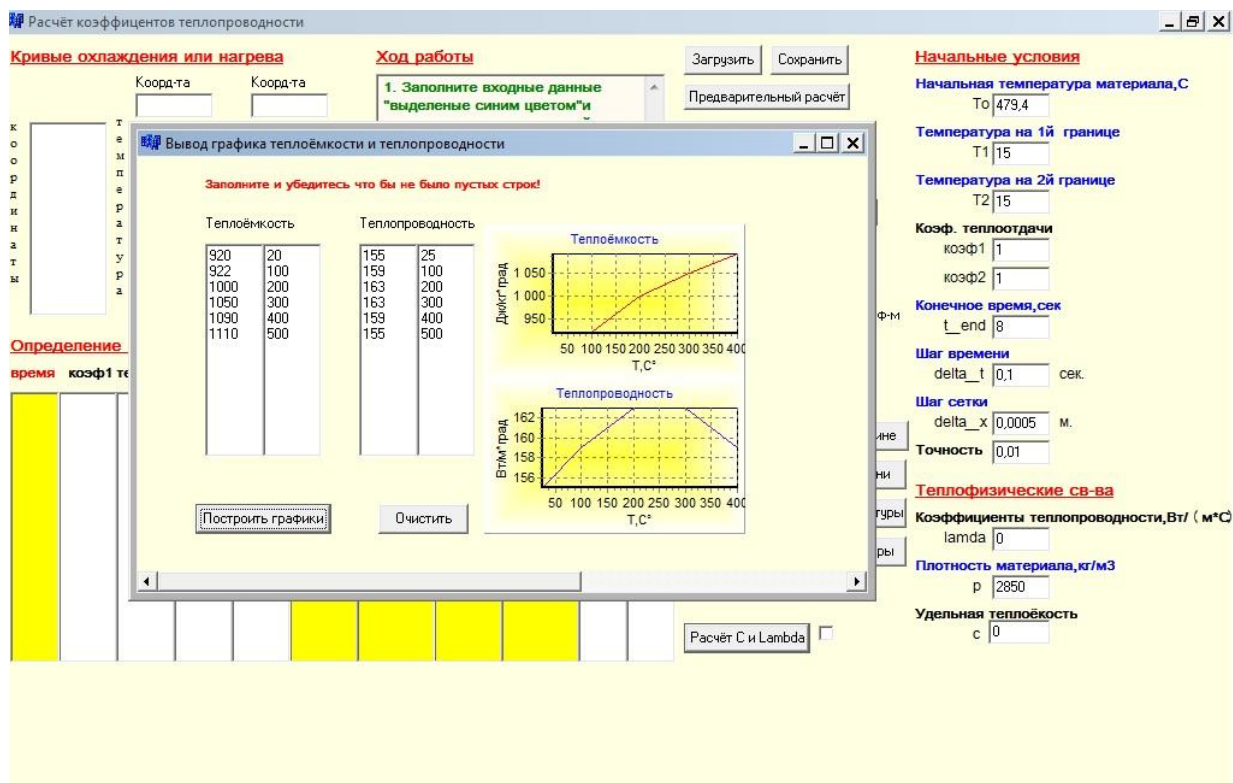


Рисунок Б.4 – Окно заполнения теплопроводности и теплоёмкости

Для проведения аппроксимации значений, нажимаем кнопку «построить графики», и ставим галочку напротив.

Следующий шаг заполнение кривых охлаждения, рисунок Б.5. Значения кривых охлаждения представлены в таблице Б.5.

Кривые охлаждения или нагрева	
Коорд-та	Коорд-та
5	25
479,4	479,4
468,7514059	468,7514059
458,1754704	458,1754704
447,6864759	447,6864759
437,2980544	437,2980544
427,0231875	427,0231875
416,8742064	416,8742064
406,8627919	406,8627919
396,9999744	396,9999744
387,2961339	387,2961339
377,761	377,761

Рисунок Б.5 – поля для заполнения кривых охлаждения

Таблица Б.5 – Значения кривых охлаждения

Время, сек	Температура, Т, С°	Время, сек	Температура, Т, С°	Время, сек	Температура, Т, С°
0	479,4	3,1	226,8144	6,1	140,7631
0,1	468,7514	3,2	222,136	6,2	136,497
0,2	458,1755	3,3	217,6705	6,3	132,4492
0,3	447,6865	3,4	213,4122	6,4	128,5977
0,4	437,2981	3,5	209,3544	6,5	124,9233
0,5	427,0232	3,6	205,4901	6,6	121,409
0,6	416,8742	3,7	201,8112	6,7	118,0409
0,7	406,8628	3,8	198,3095	6,8	114,8075
0,8	397	3,9	194,9757	6,9	111,7
0,9	387,2961	4	191,8	7	108,712
1	377,761	4,1	188,7721	7,1	105,84
1,1	368,4037	4,2	185,8808	7,2	103,083
1,2	359,2325	4,3	183,1144	7,3	100,4426
1,3	350,2554	4,4	180,4606	7,4	97,92306
1,4	341,4794	4,5	177,9062	7,5	95,53125
1,5	332,9109	4,6	175,4376	7,6	93,27666
1,6	324,5559	4,7	173,0405	7,7	91,1714
1,7	316,4195	4,8	170,6999	7,8	89,2302
1,8	308,5063	4,9	168,4002	7,9	87,47041
1,9	300,82	5	166,125	8	85,912
2	293,364	5,1	163,8574	8,1	77,92484
2,1	286,1408	5,2	161,5799	8,2	77,03985
2,2	279,1523	5,3	159,2742	8,3	76,17601
2,3	272,3998	5,4	156,9214	8,4	75,33231
2,4	265,8839	5,5	154,5019	8,5	74,50775

2,5	259,6047	5,6	151,9957	8,6	73,70134
2,6	253,5614	5,7	149,3818	8,7	72,91211
2,7	247,7526	5,8	146,6387	8,8	72,1391
2,8	242,1765	5,9	143,7444	8,9	71,38137
2,9	236,8304	6	145,272	9	70,638
3	231,711				

Нажимаем предварительный расчёт. Программа рассчитывает количество узлов, разбивает их на промежутки и выводит координаты, рисунок Б.6.

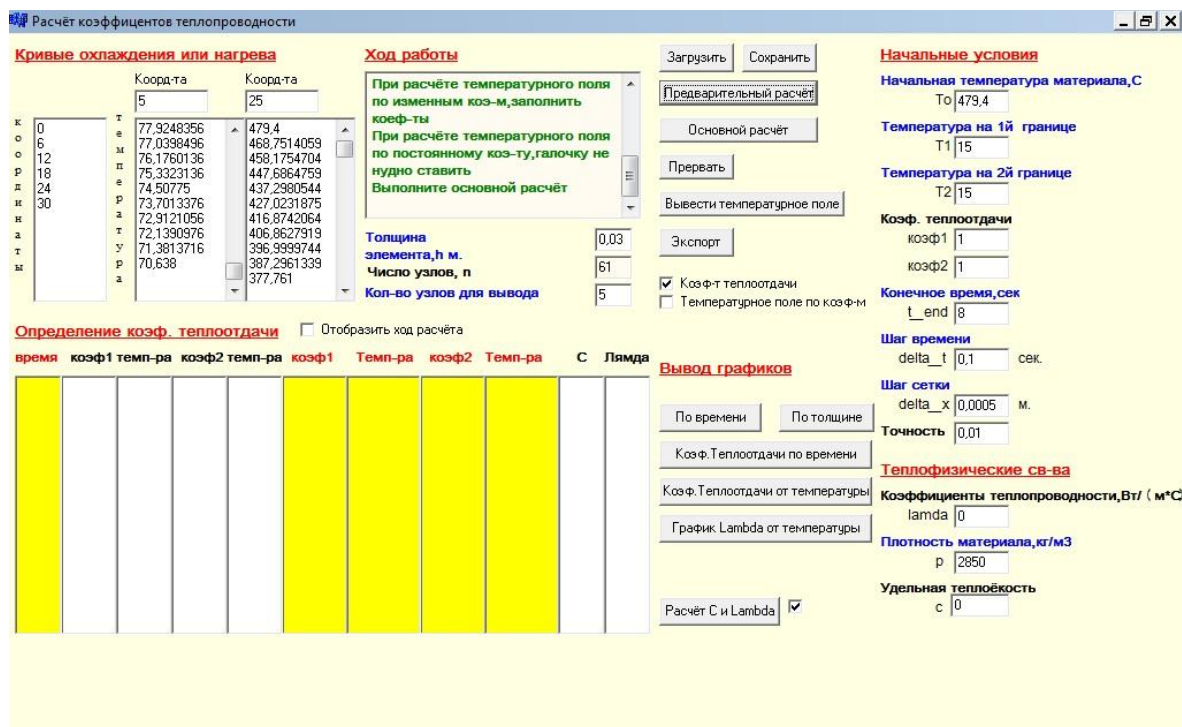


Рисунок Б.6 – Вид программы после предварительного расчёта

Основной расчёт. Расчёт коэффициента теплоотдачи с подбором теплопроводности и теплоёмкости, рисунок Б.7.

Определение коэф. теплоотдачи Отобразить ход расчёта

время	коэф1	темп-ра	коэф2	темп-ра	коэф1	Темп-ра	коэф2	Темп-ра	С	Лямда
5,70					19347	468.77070	19347	468.77080	960.5	160.98
5,80					6944	458.19440	6944	458.19460	958.4	160.87
5,90					10388	447.70510	10388	447.70560	956.1	160.75
6,00					10832	437.31630	10832	437.31690	955.0	160.69
6,10					11580	427.04140	11580	427.04200	953.8	160.63
6,20					12291	416.89210	12291	416.89290	950.5	160.46
6,30					12971	406.88060	12971	406.88160	947.3	160.30
6,40					13635	397.01780	13635	397.01890	944.3	160.14
6,50					14237	387.31390	14237	387.31490	941.5	160.00
6,60					14790	377.77830	14790	377.77950	938.7	159.86
6,70					15315	368.42110	15315	368.42230	936.1	159.72
6,80					15803	359.24980	15803	359.25110	933.6	159.59
6,90					16241	350.27270	16241	350.27400	931.1	159.47
7,00					16633	341.49670	16633	341.49810	928.8	159.35
7,10					16985	332.92790	16985	332.92930	926.6	159.23
					17278	324.57350	17278	324.57470		

Рисунок Б.7 – вывод коэффициента теплоотдачи