

На правах рукописи



Александров Андрей Алексеевич

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

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС)

Научный
руководитель:

Лившиц Александр Валерьевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный
университет путей сообщения», кафедра
«Автоматизация производственных процессов»,
заведующий кафедрой

Официальные
оппоненты:

Лапшин Владимир Леонардович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
кафедра «Сопротивление материалов и
строительной механики», профессор

Бочектуева Елена Баторовна
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский
государственный университет технологий и
управления», кафедра «Сопротивление
материалов», доцент

Ведущая
организация:

**ФГБОУ ВО «Братский государственный
университет»**

Защита состоится «23» декабря 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.022.10 при ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет» по адресу: 670000, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, д. 24а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет», расположенный по адресу: г. Улан-Удэ, ул. Ранжурова, 4а, а также на сайте: <http://www.bsu.ru/dissers/?did=533>

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук, доц.



Т. Г. Дармаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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. Решение такой задачи в каждом конкретном случае связано с необходимостью трудоемкого определения специфических параметров процесса. Исходя из вышеизложенного, разработка алгоритма идентификации температурозависимых параметров процесса термической обработки для построения системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений является актуальной задачей теоретического и практического плана.

Цель работы: разработка системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений на основе алгоритма идентификации температурозависимых параметров термической обработки при производстве мало жестких деталей.

Задачи исследования:

1. Разработать систему компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве мало жестких 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.

Методы исследования: 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 применили компьютерное моделирование в программном комплексе MSC Nastran, Marc, Sinda. Для программной реализации был использован язык C++.

Научную новизну работы составляют следующие результаты, выносимые на защиту:

1. Разработана новая система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений, представляющая 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, отличающийся универсальным подходом к определению неизвестных параметров математических моделей процесса термообработки.

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, позволяющая рассчитать коэффициент теплоотдачи и систему нестационарных тепловых полей, возникающих в процессе закалки.

Практическая значимость: 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 системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений. Разработан алгоритм корректировки условий термической обработки заготовок из алюминиевых сплавов, позволяющий снижать уровень остаточных напряжений без снижения механических свойств материала заготовки.

Апробация работы и реализация результатов диссертации: основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены 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 результаты работ были внедрены на предприятиях металлообрабатывающей отрасли (ООО «Иркутский металлообрабатывающий завод», ООО «ПромТест») с общим экономическим эффектом более 629 тысяч рублей.

Разработанное устройство определения коэффициента теплоотдачи внедрено в учебный процесс Иркутского государственного университета путей сообщения для проведения занятий по дисциплине «Материаловедение».

Публикации. По результатам исследования опубликовано одиннадцать работ, в том числе пять статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство на программу для электронных вычислительных машин.

Структура диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографического списка из 137 наименований. Диссертация содержит 165 страниц машинописного текста, 2 таблицы, 58 рисунков и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, кратко изложены полученные автором результаты аналитических и экспериментальных исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании изучения термических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, возникающих в процессе производства деталей, было выявлено, что основной причиной их возникновения является неравномерное охлаждение (нагревание). Существующие способы определения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и деформаций $\varepsilon_{ост}$ не в полной мере удовлетворяют поставленным требованиям по точности и экономичности. Существующие математические модели можно охарактеризовать как узкоспециализированные и неприменимые для описания формирования остаточных напряжений при термической обработке заготовок с дальнейшим остаточным растяжением. В то же время, при моделировании нестационарных тепловых процессов широкое распространение получили программные комплексы, реализующие численные методы расчета, которые являются мощными инструментами решения подобных прикладных задач. При этом их использование в каждом конкретном случае также связано с необходимостью трудоемкого определения

специфических параметров процесса (таких как коэффициент теплоотдачи, тепловой поток, начальные значения температуры, характеристики теплового контакта, температурозависимые теплофизические характеристики материала исследуемых тел и т.д.).

Исходя из вышеизложенного, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** представлена система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений, включающая в себя решение задачи идентификации параметров, характеризующих нестационарное тепловое поле заготовки. Блок-схема последовательности решения задач с указанием выбранного программного обеспечения для каждого этапа представлена на рис.1.

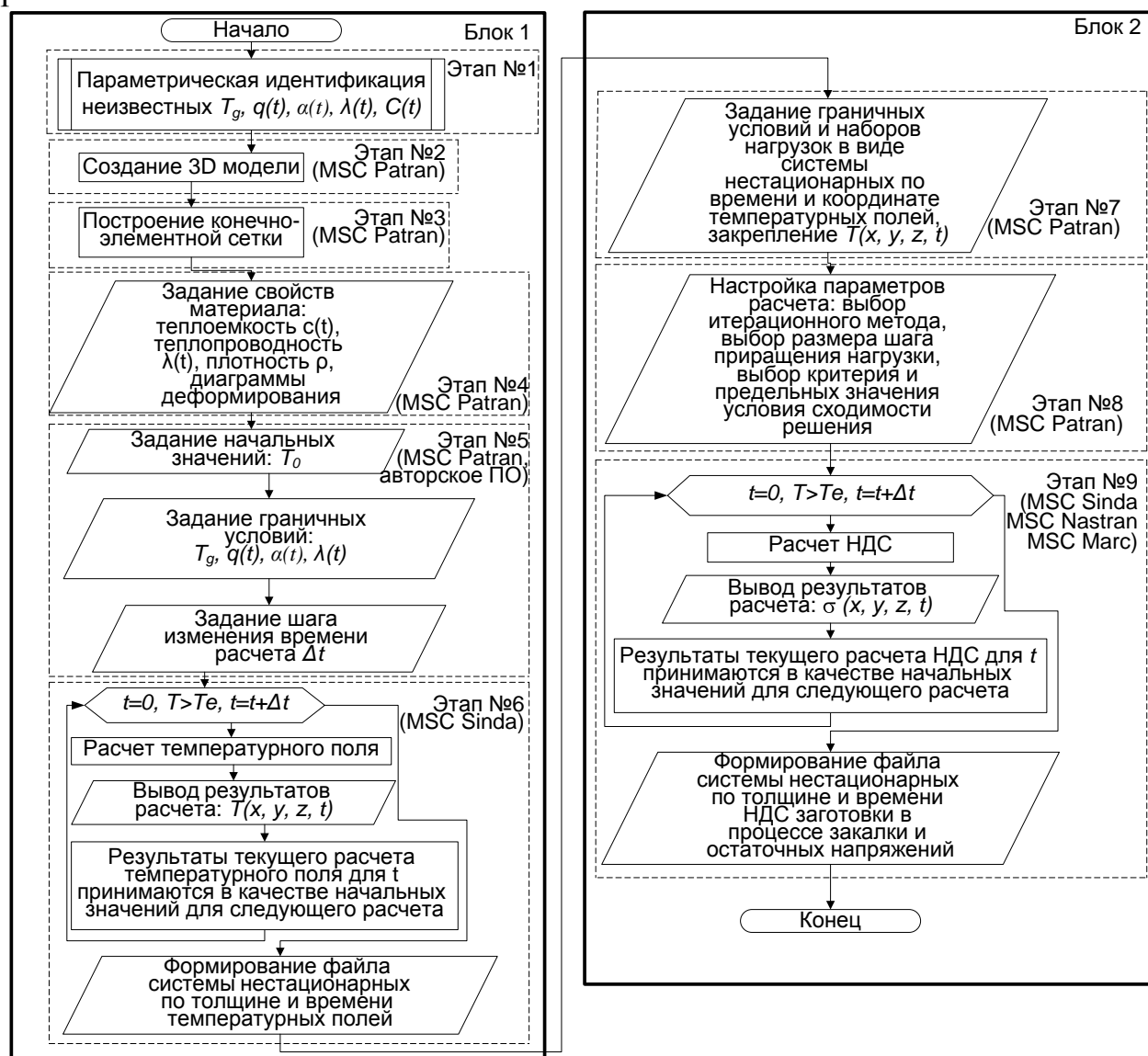


Рис. 1. Система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений

Данная блок-схема включает расчет системы нестационарных по толщине и по времени тепловых полей заготовки (блок 1), описывающих неравномерное изменение температуры исследуемой заготовки по ее габаритам и расчет

температурных напряжений и деформаций в процессе нагрева (охлаждения) (блок 2).

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 $\lambda(t)$, теплоемкости $c(t)$) 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. 2), в соответствии с которым:

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 является постоянной величиной.

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).

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

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

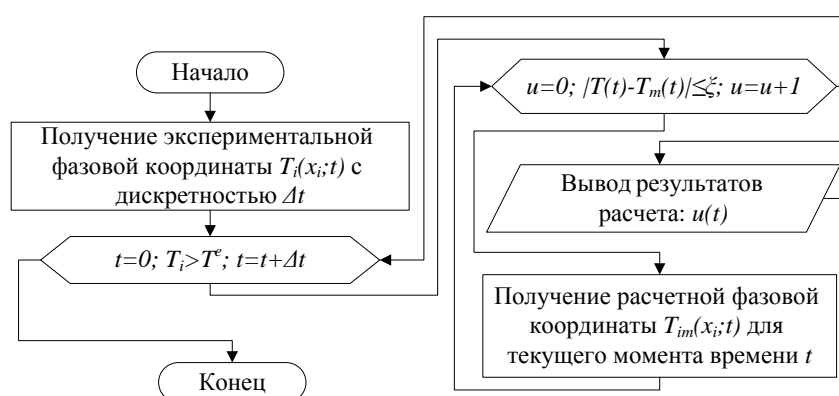


Рис. 2. Алгоритм идентификации температурозависимых параметров математической модели процесса нагрева (охлаждения)

Принимая во внимание дискретность экспериментальных значений, полученных при наблюдении за системой, можно считать $J \rightarrow \min$, если на каждом шаге Δt $e_j \rightarrow \min$. Учитывая наличие погрешности измерений экспериментальных значений ξ , определяемой условиями эксперимента и

точностью измерительных систем, возможно ограничить величину невязки величиной $k\xi$, где $k \in (0;1)$.

Согласно алгоритму параметрической идентификации расчетные кривые охлаждения определяются по уравнению теплопроводности Фурье-Кирхгофа (2) и соответствующим граничным условиям I, II, III и IV рода.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T) = 0 \quad (2)$$

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

При решении задачи параметрической идентификации фазовой координатой для всех случаев является температура, как экспериментальные ее значения $T_i = f_i(x_i, t) + \xi$, так и расчетные $T_m(t)$.

Разработанный алгоритм идентификации неизвестных параметров математической модели нагрева (охлаждения) является универсальным и позволяет определять температуру на поверхности тела, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи, теплофизические характеристики материала исследуемого тела и начальную температуру.

В **третьей главе** представлена разработанная математическая модель процесса охлаждения при закалке, включающая уравнение нестационарной теплопроводности Фурье-Кирхгофа, начальные, граничные условия III рода:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ где } 0 < x < L \\ \text{начальные условия : при } t = 0, 0 \leq x \leq L : T = T_0 \\ \text{граничные условия : при } x = 0 : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T^{e1}), \text{ где } t > 0, \alpha_1 > 0 \\ \text{при } x = L : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T - T^{e2}), \text{ где } t > 0, \alpha_2 > 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Для решения обратной задачи параметрической идентификации неизвестных параметров математической модели (3) используются экспериментальные кривые охлаждения $T_i = f_i(x_i, t)$, где $i = \overline{1, \dots, 5}$, $t > 0$, характеризующие изменение температуры по толщине исследуемого тела. Сравнение экспериментальных T_i и расчетных T_{im} кривых охлаждения осуществляется в соответствии с условием (1), обеспечивающим минимум величины квадратичного функционала невязки. Получение расчетных кривых охлаждения T_{im} проведено с использованием метода конечных разностей.

Заменяя вышеуказанное дифференциальное уравнение (3) его конечно-разностными аналогами, получаем:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right), i = 2, \dots, N-1, n \geq 0. \quad (4)$$

Представленное выражение сводится к наиболее общему виду:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad (5)$$

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

Полученные уравнения являются трехточечными разностными уравнениями второго порядка, а система (4) имеет трехдиагональную структуру. При этом существуют числа α_i и β_i ($i = \overline{1, N-1}$), при которых:

$$T_i^{n+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{n+1} + \beta_i. \quad (6)$$

В этом случае, трехточечное уравнение второго порядка (5) преобразуется в двухточечное уравнение первого порядка (6). В результате уменьшения в выражении (6) индекса i на единицу:

$$T_{i-1}^{n+1} = \alpha_i \cdot T_i^{n+1} + \beta_{i-1}, \quad (7)$$

и преобразования уравнения (5) в соответствии с полученным результатом, последнее выражение приобретает следующий вид:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot \alpha_{i-1} \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot \beta_{i-1} = F_i, \quad (8)$$

или

$$T_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} T_{i+1}^{n+1} + \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}. \quad (9)$$

Последнее равенство совпадает с выражением (6), если при всех $i=2, 3, \dots, N-1$ выполняются соотношения:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}. \quad (10)$$

Для определения α_i и β_i в соответствии с выражением (9) необходимо знать α_1 и β_1 , которые находятся из левого граничного условия.

Далее по формулам (6) последовательно находятся $T_{N-1}^{n+1}, T_{N-2}^{n+1}, \dots, T_2^{n+1}$, при условии, что T_N^{n+1} найдено из правого граничного условия.

Таким образом, решение уравнений вида (5) 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_1 и β_1 из соотношения $T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1$ представлен выражением:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_1 (T^{e1} - T|_{x=0}) \Rightarrow -\lambda \frac{T_2 - T_1}{h} = k_1 (T^{e1} - T_1). \quad (11)$$

Если $\frac{k \cdot h}{\lambda} = B_i$, то

$$\begin{aligned} T_1 - T_2 &= B_{i_1} \cdot T^{e1} - B_{i_1} \cdot T_1 \\ T_1 &= \frac{1}{1 + B_{i_1}} \cdot T_2 + \frac{B_{i_1}}{1 + B_{i_1}} \cdot T^{e1} \\ \left\{ \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{1 + B_{i_1}} = \frac{\lambda}{\lambda + h \cdot k_1} \\ \beta_1 &= \frac{B_{i_1}}{1 + B_{i_1}} \cdot T^{e1} = \frac{h \cdot k_1}{\lambda + h \cdot k_1} \cdot T^{e1} \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

Правое граничное условие необходимо для определения температуры T_N .

$$T_N = \frac{\beta_{N-1} + Bi_2 \cdot T^{e2}}{1 + Bi_2 - \alpha_{N-1}}$$

или

$$T_N = \frac{\lambda \cdot \beta_{N-1} + h \cdot k_2 \cdot T^{e2}}{h \cdot k_2 + \lambda \cdot (1 - \alpha_{N-1})}$$

Также была проведена дискретизация граничных условий III рода с погрешностью $O(\quad)$. Так, на границе выполняется уравнение теплопроводности (4):

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{или} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

где $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ – коэффициент температуропроводности материала.

Разложение функции $T(x)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $x=0$ до членов второго порядка относительно h дает следующий результат:

$$T_2^{n+1} = T_1^{n+1} + h \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}^{n+1} + \frac{h^2}{2} \cdot \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{x=0}^{n+1}, \quad (12)$$

или, в соответствии с (12):

$$T_2^{n+1} = T_1^{n+1} + h \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}^{n+1} + \frac{h^2}{2 \cdot a} \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{x=0}^{n+1}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}^{n+1} = \frac{T_2^{n+1} - T_1^{n+1}}{h} - \frac{h}{2 \cdot a} \cdot \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\tau} = \frac{k_1}{\lambda} \cdot T_1^{n+1} - \frac{k_1}{\lambda} \cdot T^{e1}$$

$$T_1^{n+1} = \alpha_1 \cdot T_2^{n+1} + \beta_1$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \tau}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_1)}; \\ \beta_1 = \frac{h^2}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_1)} \cdot T_1^n + \frac{2 \cdot a \cdot \tau \cdot Bi_1 \cdot T^{e1}}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_1)}. \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \tau \cdot \lambda}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\lambda + h \cdot k_1)}; \\ \beta_1 = \frac{\lambda \cdot h^2 \cdot T_1^n + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot h \cdot k_1 \cdot T^{e1}}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\lambda + h \cdot k_1)}. \end{cases}$$

Правое граничное условие дает соотношение:

$$T_N^{n+1} = \frac{h^2 \cdot T_N^n + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\beta_{N-1} + Bi_2 \cdot T^{e2})}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (1 + Bi_2 - \alpha_{N-1})} = \frac{\lambda \cdot h^2 \cdot T_N^n + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\lambda \cdot \beta_{N-1} + h \cdot k_2 \cdot T^{e2})}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (h \cdot k_2 + \lambda \cdot (1 - \alpha_{N-1}))}.$$

Аппроксимация дифференциального уравнения Фурье-Кирхгофа и дискретизация граничных условий выполнена с первым порядком точности по времени и вторым порядком точности по координате. При этом неявная разностная схема является абсолютно устойчивой, т.е. можно проводить интегрирование краевой задачи (3) с любым разностным шагом по времени.

Учитывая нелинейно изменяющиеся параметры, входящие в граничные условия, решение задачи параметрической идентификации – определение коэффициента теплоотдачи из (3) – представляется весьма трудоемкой задачей. Поэтому расчет температурно-зависимого коэффициента теплоотдачи осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом параметрической идентификации, реализованном в авторском программном обеспечении, написанном на языке C++. Разработанный программный комплекс (АС №2015617306) позволяет определять значения коэффициента теплоотдачи и нестационарное тепловое поле с учетом температурно-зависимых теплофизических свойств материала.

Расчет коэффициента теплоотдачи производится для условно стационарного состояния теплового поля. При этом в расчетах используются экспериментально установленные значения температуры тела в сечениях заготовки на заданной глубине. Экспериментальные кривые охлаждения получены с использованием разработанного в рамках диссертационного исследования устройства (патент на полезную модель №155337). Конструкция устройства представлена на рис. 3.

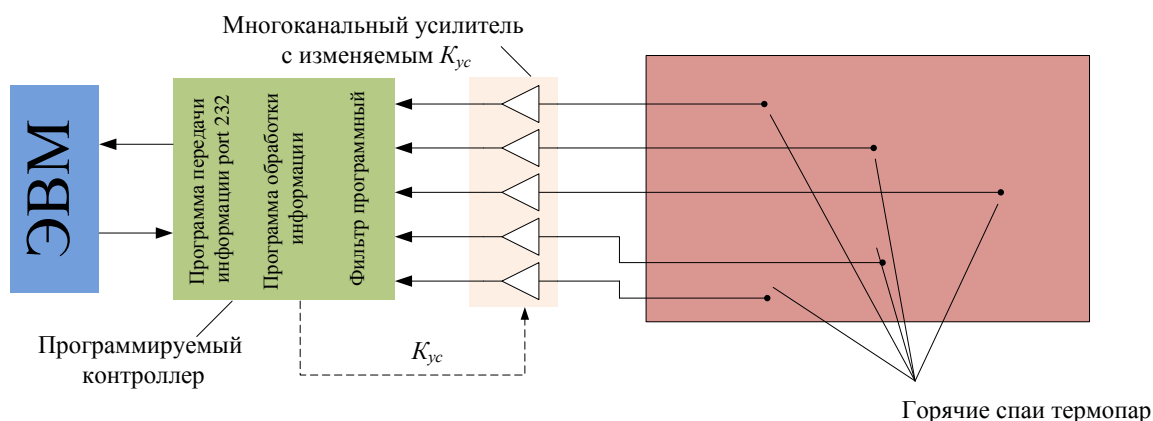


Рис. 3. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи

Равномерно прогретый экспериментальный образец, представляющий собой призматическую заготовку из высокопрочного алюминиевого сплава В95 с расположенными внутри на разном расстоянии от поверхности термоэлектрическими преобразователями (рис. 4), погружается в охлаждающую среду, и далее фиксируются временные зависимости температуры в заданных сечениях (кривые охлаждения) (рис. 5).

Второй этап характеризуется значительным снижением коэффициента теплоотдачи (в 2 раза). Наблюдаемое явление объясняется установившимся режимом пленочного кипения (градиент температур ΔT , возникающий между телом и охлаждающей средой, превышает второй кризис кипения Δt_{cr2} , характеризующийся снижением коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ за счет образования плотного парового слоя, изолирующего горячую поверхность заготовки от закалочной жидкости).

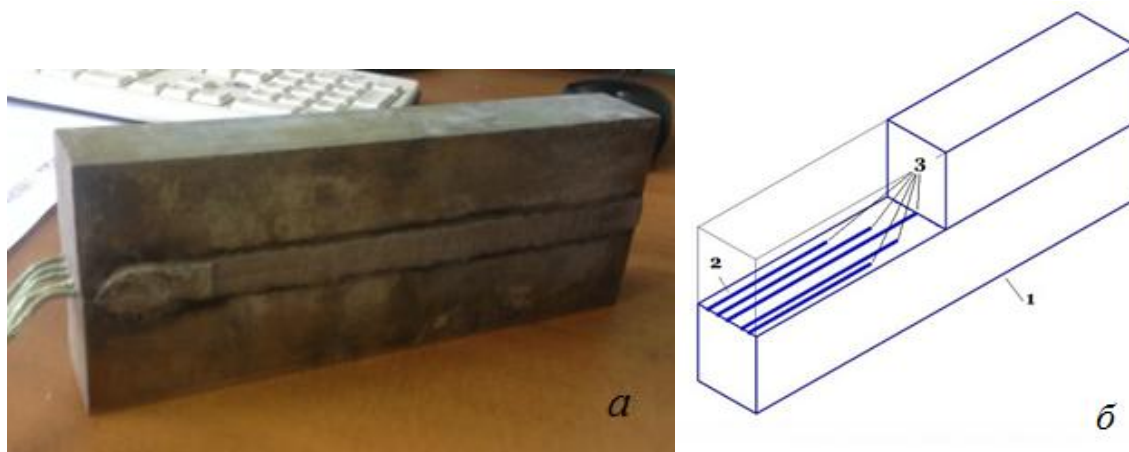


Рис. 4. Опытный образец (а) и схемой (б), термопарами 1 расположенными в пазах размерами 1*1 мм для установки термодпар – 2 по толщине образца, пазы расположены вдоль образца. Горячие спаи термодпар приварены контактной сваркой в местах – 3 и расположены таким образом, что не оказывают влияния на перемещение изотермы по толщине образца

Представленное устройство позволяет определять коэффициент теплоотдачи $\alpha(t)$ в условиях асимметричного охлаждения исследуемого тела.

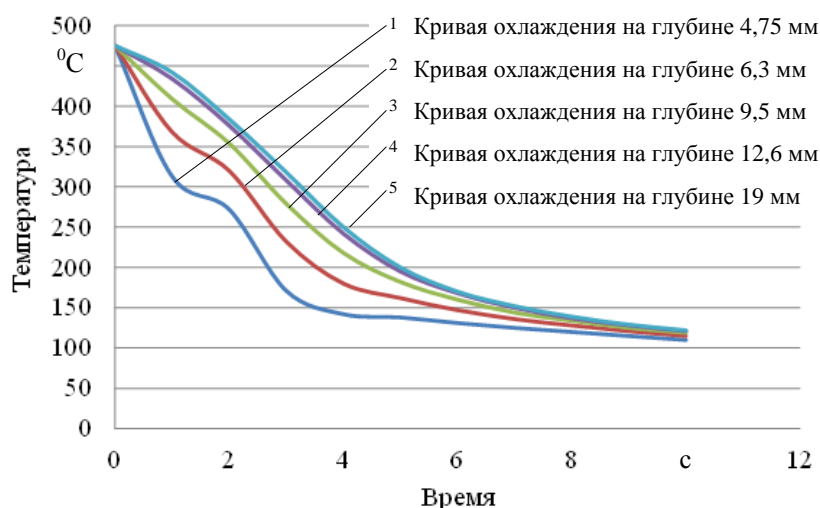


Рис. 5. Усредненные кривые охлаждения, полученные при выборке из 11 экспериментов с использованием предложенного устройства определения коэффициента теплоотдачи

Анализируя полученную зависимость (рис. 6) коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности охлаждаемого тела, можно выделить четыре основных этапа изменения.

На первом этапе происходит погружение заготовки в закалочную среду с увеличением коэффициента теплоотдачи. Последнее объясняется вынужденной конвекцией (плотная паровая рубашка, образованная большой разницей температур между охлаждаемым телом и закалочной средой, сбивается при погружении заготовки в объем жидкости).

Третий этап соответствует повышению коэффициента теплоотдачи за счет перехода от пленочного режима кипения к пузырьковому (градиент температур ΔT снижается и достигает значений первого кризиса кипения Δt_{cr1} . При этом значения коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ достигают максимальных значений с увеличением интенсивности охлаждения, несмотря на снижение градиента температур).

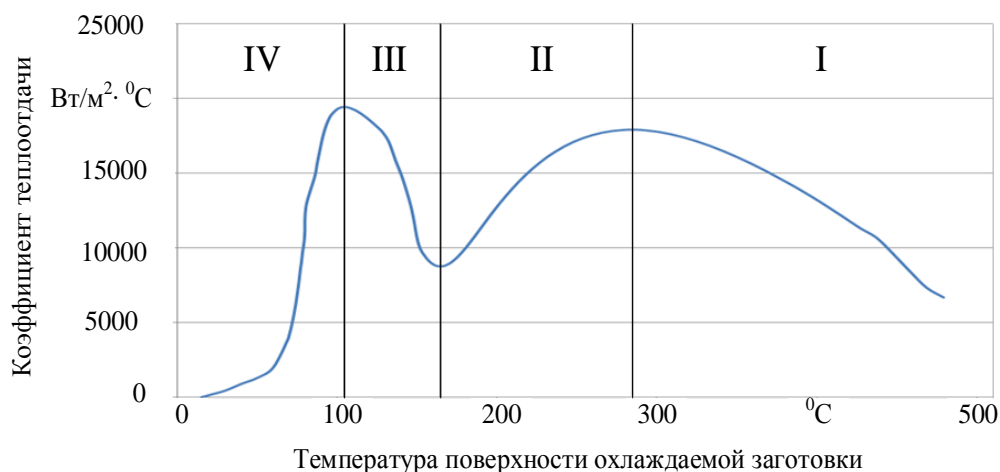


Рис. 6. Температурно-зависимый коэффициент теплоотдачи

На четвертом этапе температура тела опускается ниже температуры кипения закалочной жидкости, происходит теплообмен посредством свободной конвекции, который характеризуется низкими значениями коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. Обоснована необходимость определения диаграмм напряжений и деформаций в интервале температур закалки для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния заготовки. Принимая во внимание отсутствие вышеуказанной информации в виде справочных данных, в рамках исследования, проведены испытания на растяжение стандартных образцов из алюминиевого сплава В95, соответствующих ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9651-84. Испытания проведены на машине Instron 5982 с использованием специализированной высокотемпературной камеры.

Учитывая температуру нагрева при закалке, испытания проводили в диапазоне температур 20-475 °C. В соответствии с результатами испытаний (рис. 7), с повышением температуры имеет место тенденция к увеличению относительного удлинения, снижению предела текучести и предела прочности материала, что важно для понимания физики процесса формирования термических остаточных напряжений.

Представлены результаты математического моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений в виде нестационарных тепловых полей, напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе закалки и остаточных напряжений $\sigma_{ост}$. Расчеты производили для заготовки из алюминиевого сплава В95, с габаритами 390·260·38 мм. Для

данного варианта расчета определены размер и тип конечного элемента 24,75·26·6,33 мм Hex 8.

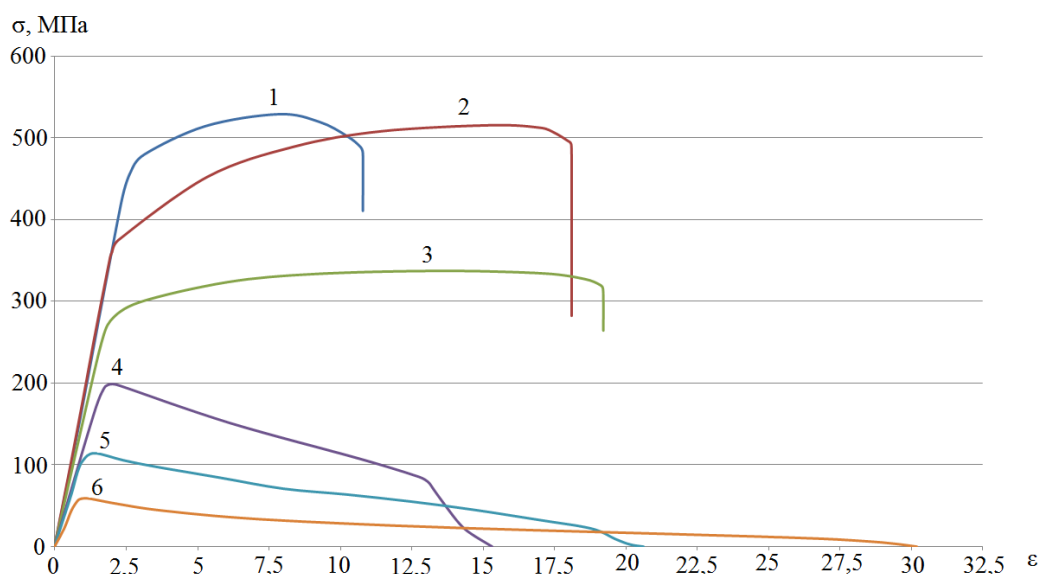


Рис. 7. Диаграммы напряжений деформаций сплава В95 в диапазоне температур от 20 до 475 °С, где 1 - при температуре $T=20$ °С, 2 - при $T=100$ °С, 3 - при $T=200$ °С, 4 - при $T=300$ °С, 5 - при $T=400$ °С, 6 - при $T=475$ °С

Адекватность результатов расчета подтверждена сравнением с результатами экспериментальных исследований С.К. Каргапольцева, С.И. Ключникова, А.В. Лившица, А.И. Промптова. Расхождение значений расчетных и экспериментальных термических остаточных напряжений не превышает 7% (рис. 8).

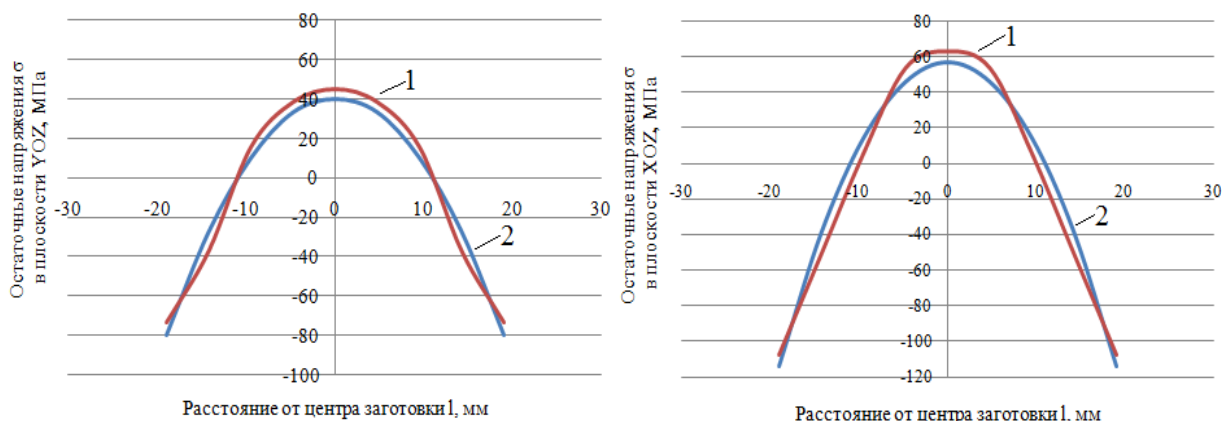


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные значения остаточных напряжений $\sigma_{ост,1}$ – расчетная эпюра напряжений, 2 – экспериментальная эпюра напряжений

При этом в соответствии с методикой расчета остаточных деформаций $\epsilon_{ост}$ полотна методом вырезания полосок (А.С. №1643928, от 22.12.90), действующие изгибающие моменты и сжимающие (растягивающие) силы, вызывающие остаточные деформации $\epsilon_{ост}$ полотна после механической обработки термически обработанных заготовок рассчитываются по площади фигур, ограниченных эпюрами удаляемых частей сечения заготовки. Площади

фигур, ограниченных расчетными и экспериментальными эпюрами, отличаются друг от друга не более чем на 3%. Высокая сходимость площадей фигур обеспечивает высокую точность расчета остаточных деформаций $\varepsilon_{ост}$ полотна.

Учитывая, что технологический процесс производства заготовок из алюминиевых сплавов включает в себя проведение растяжения с остаточной деформацией 0,5-3 % после проведения закалки с целью минимизации остаточных напряжений. В рамках исследования проведено математическое моделирование процесса вышеуказанных операций. Соответствие минимального уровня остаточных деформаций вышеуказанному диапазону удлинения (рис. 9) является косвенным признаком адекватности математической модели.

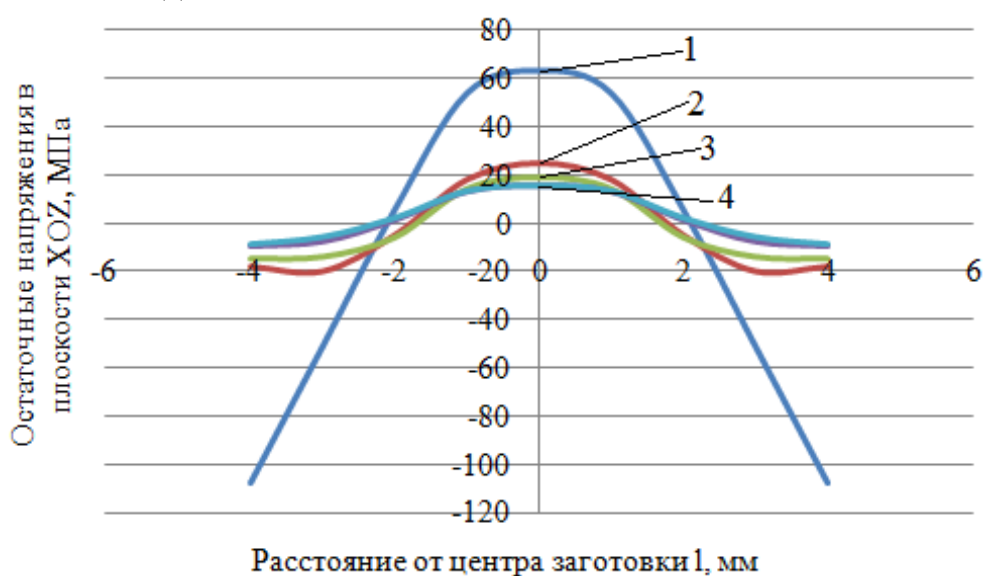


Рис. 9. Термические остаточные напряжения, после закалки и растяжения, 1 – после закалки, 2 – после растяжения с деформацией 0,5%, 3 – с деформацией 1%, 4 – с деформацией 1,5%

Одним из основных преимуществ математического моделирования процесса формирования термических остаточных напряжений является возможность изучения физики процесса. Анализ временных зависимостей предела текучести σ_T и температурных напряжений $\sigma_{темн}$ на поверхности заготовки (рис. 10), возникающих в процессе термической обработки, показывает, что уже на начальном этапе охлаждения температурные напряжения $\sigma_{темн}$ превышают предел текучести материала заготовки, что приводит к образованию неравномерных по толщине пластических деформаций, которые в последующем формируют остаточные напряжения $\sigma_{ост}$.

В соответствии с вышеизложенным сделан вывод о том, что при снижении скорости охлаждения заготовки произойдет снижение температурных напряжений, пластических деформаций и соответственно снижение уровня остаточных напряжений $\sigma_{ост}$.

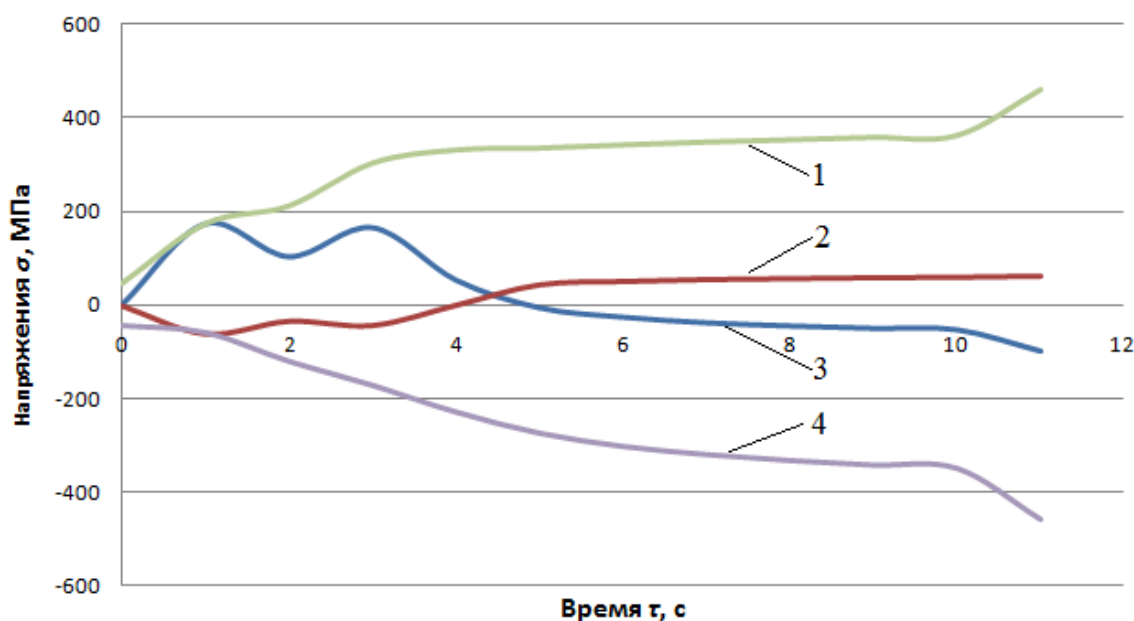


Рис. 10. Кривые зависимости предела текучести материала заготовки от температуры во времени в процессе закалки, где 1 – зависимость предела текучести поверхностного слоя от времени, 2 – зависимость температурных напряжений в центре заготовки от времени, 3 – зависимость температурных напряжений на поверхности заготовки от времени, 4 – зависимость предела текучести центрального слоя от времени

При этом необходимо отметить, что важным условием закалки, обеспечивающим повышение механических свойств, является охлаждение материала со скоростью охлаждения выше критической $v_{кр}$. В данном случае, скорость охлаждения сплава равна $167\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а критическая скорость охлаждения $v_{кр}$ сплава В95 равна $110\text{-}120\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Соответственно, для снижения уровня остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ необходимо производить термическую обработку с минимальной скоростью, превышающей критическую.

В главе также проанализирован уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в краевых зонах заготовки (рис. 11а). Распределение напряжений в краевых зонах значительно отличается от напряжений в основной части заготовки (рис. 11б), что подтверждает технологические рекомендации по удалению этих зон и является косвенным признаком адекватности математической модели. Ширина удаляемых краевых зон принимается равной толщине заготовки, что хорошо согласуется с принципом Сен-Венана.

Разработанная система компьютерного моделирования представляет собой совокупность программных комплексов: авторского программного комплекса (свидетельство №2015617306), MSC Nastran, Marc, Sinda, связанных соответствием форматов входных и выходных данных. Каждый из перечисленных программных комплексов решает свой круг задач, от решения которых зависит поэтапное достижение поставленной перед системой цели.

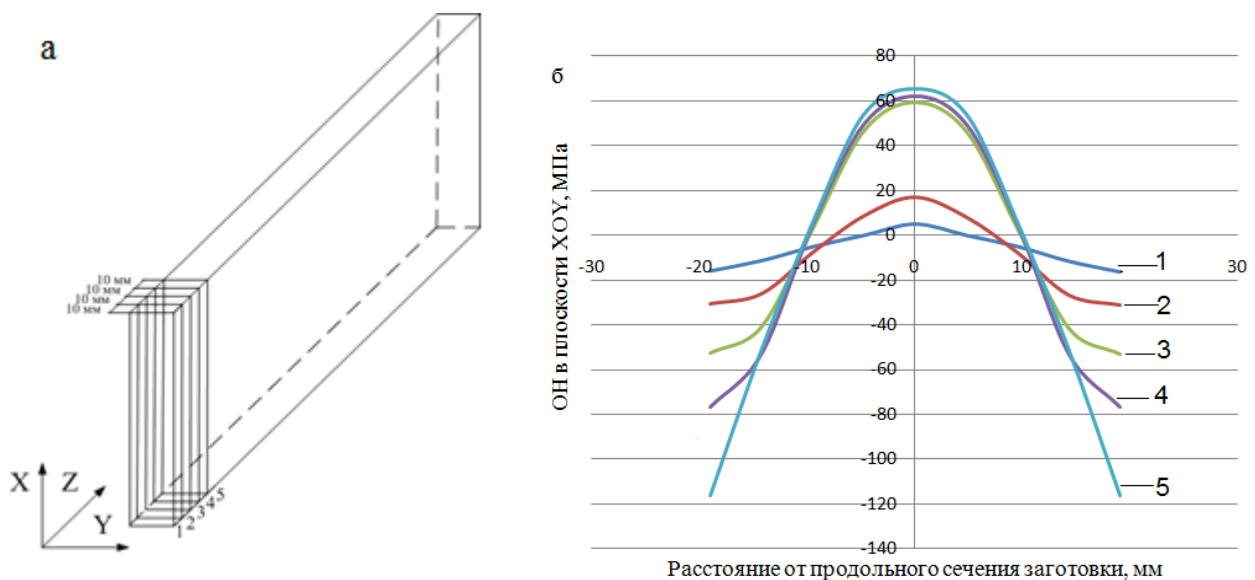


Рис. 11а. Сечения 1, 2, 3, 4 и 5 в заготовке с размерами 390*260*38 мм, рис. 11б. эпюры остаточных напряжений, 1 – эпюра напряжений в сечении 1 на торцевой грани заготовки, 2 – эпюра напряжений в сечении 2 на расстоянии 10 мм от грани заготовки, 3 – 3, 20 мм, 4 – 4, 30 мм, 5 – эпюра напряжений в сечении 5, 40 мм

На основе созданной системы компьютерного моделирования, позволяющей прогнозировать термические остаточные напряжения, разработан алгоритм минимизации термических остаточных напряжений, общих и локальных остаточных деформаций. Алгоритм основан на корректировке условий термической обработки (рис. 12).

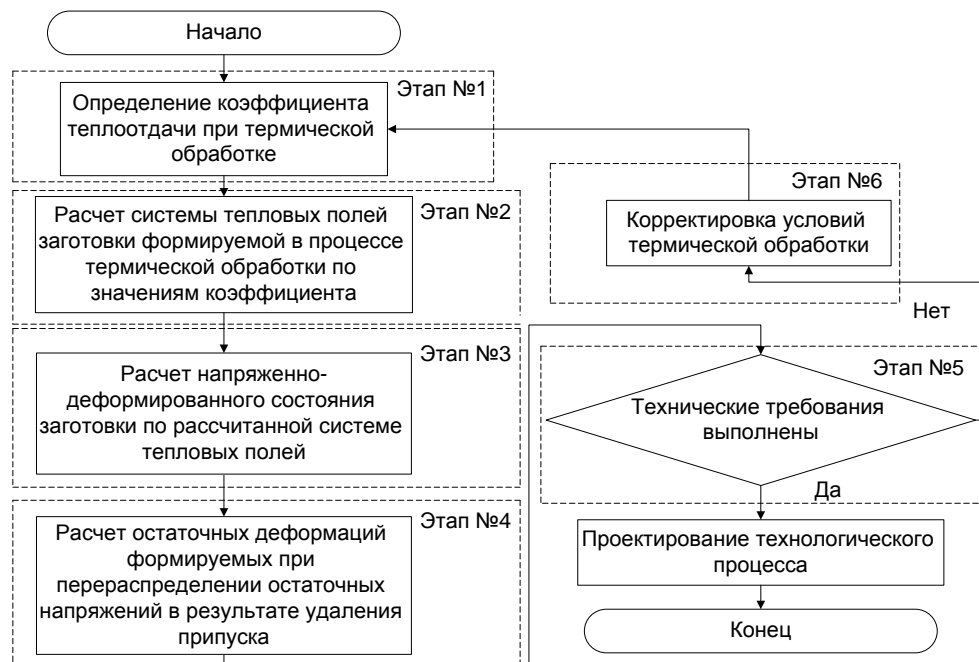


Рис. 12. Алгоритм корректировки условий термической обработки заготовок

В основу алгоритма положены условия обязательного превышения критической скорости охлаждения сплава и обеспечения минимальных значений термических остаточных напряжений.

Вышеприведенные алгоритмы корректировки условий термообработки, расчета термических остаточных напряжений и их релаксации путем пластического деформирования заготовок легли в основу алгоритма минимизации общих и локальных остаточных деформаций (рис. 13) с целью повышения качества, снижения себестоимости производства маложестких деталей.

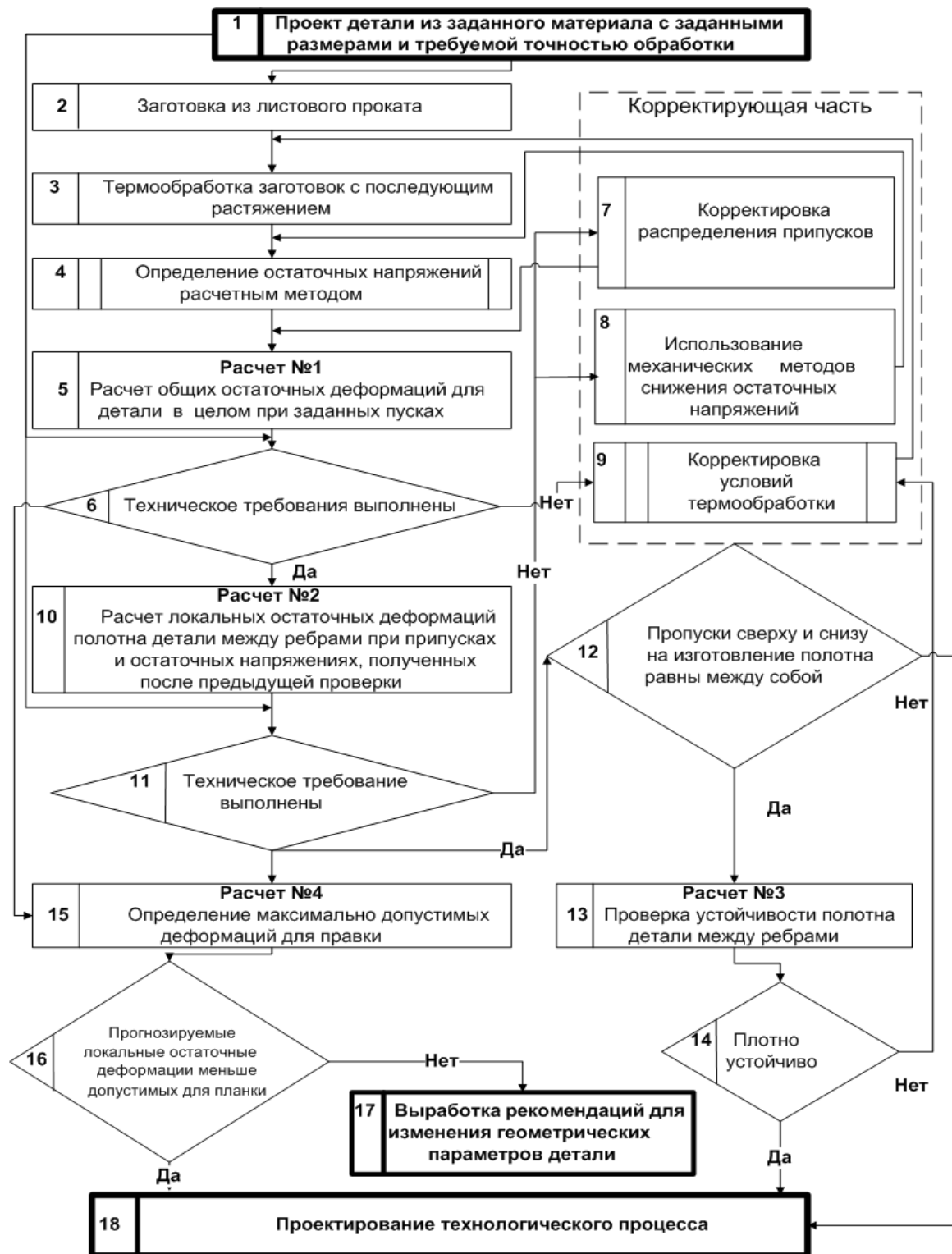


Рис. 13. Алгоритм минимизации термических остаточных напряжений, общих и локальных остаточных деформаций

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Александров А.А. Прогнозирование динамики охлаждения заготовок из алюминиевых сплавов при термообработке [Текст] / А.А. Александров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2014. - №1 – С. 140-144.

2. Александров А.А. Прогнозирование остаточных напряжений, возникающих при термообработке алюминиевых сплавов [Электронный ресурс] / А.А. Александров // «Инженерный вестник Дона», 2015. №4 – Режим доступа: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3367>

3. Александров А.А. Прогнозирование температурного поля для определения остаточных напряжений возникающих при термообработке алюминиевых сплавов [Электронный ресурс] / А.А. Александров, А.В. Лившиц // Наука и образование. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2014. - №7. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717560.html>

4. Александров А.А. Расчет термических остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов [Текст] / А.А. Александров, А.В. Лившиц, А.В. Рудых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2016. - №1 – С. 52-56.

5. Александров А.А. Математическое моделирование процесса охлаждения заготовок из алюминиевых сплавов при термообработке [Текст] / А.А. Александров // «Вестник БГУ. Математика, информатика». – 2016. – №3 - с. 15-22.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации:

6. Устройство для определения коэффициентов теплоотдачи. Патент на полезную модель №155337 / А.А. Александров, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, С.И. Попов, С.Н. Филатова // Патентообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10.10.2015.

7. Программный комплекс моделирования процесса нагрева (охлаждения) при термообработке. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617306 / А.А. Александров, А.В. Лившиц, А.В. Плюснин // Патентообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06.07.2015.

Публикации в других изданиях:

8. Александров А.А. Прогнозирование нестационарного температурного поля для определения остаточных напряжений при термической обработке алюминиевых сплавов / А.В. Лившиц // Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири», Иркутск, 10-11 апреля 2014 г.

9. Александров А.А. Исследования остаточных напряжений в заготовках при термической обработке / А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, С.И. Попов // Проблемы транспорта Восточной Сибири: сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых факультета «Транспортные системы» и «Системы обеспечения транспорта», 25-26 апреля 2013 г. – Иркутск. – 2013. с. 113-116.

10. Александров А.А. Остаточные напряжения, возникающие при термической обработке заготовок из алюминиевых сплавов / А.В. Лившиц // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: сборник трудов V международной научно-практической конференции, 31 марта – 4 апреля 2014 г. – Иркутск, – 2014. С. 416-423.

11. Александров А.А. Прогнозирование остаточных напряжений алюминиевых сплавов при термической обработке / Е.В. Зеньков // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 28-30 апреля 2014 г. – Иркутск, 2014. – С. 279-283.