



Утверждаю:

Ректор Братского государственного  
университета  
д.т.н., проф. Белокобыльский С.В.

«23» ноября 2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» на диссертационную работу Александрова Андрея Алексеевича «Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### 1. Актуальность темы диссертационного исследования

Маложесткие детали, испытывающие остаточные деформации под действием термических остаточных напряжений, имеют высокие требования к точности формы и размеров. Остаточные деформации приводят к браку, снижению качества и повышению себестоимости их производства. Поэтому, с ростом производительности компьютерной техники и развитием современных программных комплексов, реализующих численные методы, исследованию проблем определения остаточных напряжений расчетными методами в последнее время уделяется все большее внимание. Важным в этом плане является поиск и разработка новых алгоритмов, систем и математических моделей, учитывающих физику протекающих процессов. Поэтому тема диссертационной работы Александрова Андрея Алексеевича, является актуальной.

В соответствии с обоснованной актуальностью автор выбирает структуру работы таким образом, чтобы достичь поставленной цели исследования и решить все сформулированные для ее достижения задачи.

### 2. Структура и содержание диссертации

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ИрГУПС). Объем работы - 165 страниц машинописного текста, перечень литературы включает 137 наименований. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

**Во введении** даёт обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи диссертационных исследований, обозначены объект, предмет, методы и средства исследования, представлена новизна и практическая ценность основных научных положений.

**Первая глава** диссертации посвящена вопросам, связанным с современным состоянием математического моделирования остаточных

напряжений. Проведенный анализ позволил сделать вывод, что существующие математические модели характеризуются узкой специализацией, что обусловлено различием физических процессов, вызывающих деформации и напряжения. Сделан вывод, что высокопроизводительная компьютерная техника настоящего времени позволяет моделировать сложные нелинейные динамические процессы формирования напряженно-деформированного состояния твердых тел с использованием современных программных комплексов, реализующих численные методы. При этом, их использование в каждом конкретном случае так же связано с необходимостью трудоемкого определения специфических параметров процесса (таких как, кривые ползучести материала в диапазоне температур обработки, распределение углерода по толщине при цементации и другие). Например, для решения проблемы, связанной с определением неизвестных параметров процесса нагрева (охлаждения) при термической обработке, можно воспользоваться параметрической идентификацией по экспериментальным данным. Учитывая нелинейно изменяющиеся параметры, предлагается использовать эффективные численные методы с применением современных компьютерных технологий.

**Во второй главе** предложен универсальный алгоритм параметрической идентификации неизвестных температурозависимых параметров, характеризующих процесс нагрева (охлаждения), позволяющий решать обратную задачу теплопроводности. Разработанный алгоритм необходим для определения начальных, граничных условий (температура на поверхности исследуемого тела, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи, тепловой контакт) и теплофизических характеристик материала исследуемого тела (теплопроводность, теплоемкость). Предложенный алгоритм параметрической идентификации лег в основу блок-схемы, описывающей последовательность решения задач с указанием выбранного программного обеспечения для каждого этапа.

**В третьей главе** представлена математическая модель процесс нагрева (охлаждения) при закалке, используемая для решения обратной задачи параметрической идентификации совместно с экспериментальными кривыми охлаждения. Описывается решение приведенной математической модели методом конечных разностей по неявной схеме. Программное обеспечение, реализующее математическую модель и алгоритм идентификации, позволяет рассчитывать коэффициент теплоотдачи и систему нестационарных тепловых полей заготовки при закалке. Так же в приведено описание устройства определения коэффициента теплоотдачи, позволяющее получить экспериментальные кривые охлаждения и рассчитать искомый параметр.

**В четвертой главе** представлена система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей, состоящая из авторского программного обеспечения и программных комплексов MSC Nastran, Marc, Sinda, связанных соответствием форматов входных и выходных данных. Каждый программный комплекс решает свой круг задач, решение которых

необходимо для достижения общей цели. Представлены результаты расчета термических остаточных напряжений, которые хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Погрешность не превышает 5%. На основании результатов математического моделирования изучен процесс их формирования и предложены пути их минимизации. Таким образом, разработанная система компьютерного моделирования позволила сформировать алгоритм минимизации термических остаточных напряжений, общих и локальных остаточных деформаций.

**В заключении** отмечается, что на основании проведенных исследований решена актуальная проблема определения термических остаточных напряжений расчетным методом и изучен процесс их формирования.

Вышеуказанная структура диссертации позволяет автору решить поставленные задачи и получить интересные результаты.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает основные результаты выполненных исследований.

Заслуживает отдельного внимания научная новизна работы, в частности:

### **3. Научная новизна работы**

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.

### **4. Достоверность научных результатов**

Диссертационная работа производит впечатление цельного самостоятельного исследования, основные научные положения, выводы, предложения и рекомендации достаточно логичны и аргументированы.

Достоверность научных результатов обоснована изложенных в

диссертационной работе, подтверждается корректным применением математических методов и алгоритмов, применением аттестованных измерительных средств, совпадением результатов моделирования и экспериментальных данных.

### **5. Теоретическая значимость работы**

Значение для теории имеют:

1. Алгоритм параметрической идентификации, позволяющий определять неизвестные температурозависимые параметры широкого перечня процессов нагрева (охлаждения);

2. Математическая модель процесса нагрева (охлаждения) при закалке;

3. Выявленные в результате математического моделирования закономерности формирования термических остаточных напряжений в краевых зонах и по поверхности призматической заготовки, возникновение пластических деформаций, формирующих остаточные напряжения, на начальном этапе термической обработки.

### **6. Практическая значимость работы**

Значение для практики имеют:

1. Программное обеспечение, реализующее авторский алгоритм параметрической идентификации и математическую модель процесса нагрева (охлаждения), позволяющее рассчитывать коэффициент конвективной теплоотдачи и нестационарное тепловое поле заготовки по экспериментальным кривым охлаждения.

2. Система компьютерного моделирования, позволяющая рассчитывать термические остаточные напряжения без разрушения заготовки, включающая в себя авторское программное обеспечение и программные комплексы MSC Patran, Marc, Nastran, Sinda.

3. Алгоритм минимизации остаточных напряжений, общих и локальных деформаций, разработанный на основе системы компьютерного моделирования термических остаточных напряжений.

### **7. Реализация научных результатов**

Результаты работы внедрены в процесс производства маложестких деталей промышленных предприятий ООО «Промтест», ООО «Иркутский металлообрабатывающий завод» с общим экономическим эффектом 629 тыс. рублей.

### **8. Рекомендации по использованию результатов**

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуется использовать на предприятиях, связанных с термической и механической обработкой заготовок с целью снижения брака маложестких деталей, связанного с их короблением, и снижением себестоимости производства. Созданную систему компьютерного моделирования целесообразно использовать, как для решения задач, связанных с прогнозированием уровня

остаточных напряжений, так и для углубленного изучения напряженно-деформированного состояния, возникающего при термической обработке.

## **9. Соответствие паспорту специальности**

Диссертация соответствует специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а именно:

пункту 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» соответствуют следующий научный результат:

- алгоритм параметрической идентификации неизвестных 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.

пункту 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» соответствуют следующий научный результат:

- авторское программное обеспечение, реализующее метод конечных разностей, метод прогонки, универсальный алгоритм идентификации параметров, характеризующих процесс нагрева (охлаждения) исследуемого тела при закалке, позволяющее рассчитывать нестационарное тепловое поле и коэффициент теплоотдачи по экспериментальным кривым охлаждения.

пункту 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» соответствуют следующий научный результат:

- на основе математического моделирования закалки заготовок, проведено комплексное исследование формирования остаточных напряжений, позволившее выявить влияние механических свойств и режимов термической обработки на формируемые остаточные напряжения.

## **10. Замечания**

По диссертации имеется ряд замечаний, которые не снижают общего высокого качества выполненной работы:

- разработанная математическая модель описывает теплообмен одномерного тела, однако результаты расчета нестационарного теплового поля, приведенные в четвертой главе, соответствуют трехмерному телу;

- во второй главе диссертации приводится блок-схема, описывающая систему компьютерного моделирования, а в выводах этой же главы ничего не говорится о создании описанной системы;

- отсутствуют сведения о пересчете значений термо-ЭДС, выдаваемых термоэлектрическими преобразователями, в значения температуры с учетом коэффициента усиления;

- в главе 4 представлен алгоритм корректировки условий термической

обработки, позволяющий определить оптимальную скорость охлаждения при закалке, однако в диссертационной работе описание критериев оптимизации не приводится.

### 11. Заключение

Диссертация Александрова Андрея Алексеевича представляет собой законченную квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, в которой содержатся научно-обоснованные решения задач определения термических остаточных напряжений путем разработки системы компьютерного моделирования, внедрение которых обеспечивает снижение продолжительности и себестоимости изготовления маложестких деталей, повышение их за счет минимизации остаточных деформаций и снижения процента брака.

Диссертационная работа Александрова Андрея Алексеевича по форме и содержанию соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Автор диссертации Александров А.А. заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв подготовил:

Заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «БрГУ»,

д.т.н., профессор

Янюшкин  
Александр Сергеевич

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании НТС ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», протокол № 4 от 22 ноября 2016 г.

Проректор по научной и инновационной деятельности

ФГБОУ ВО «БрГУ»,

к.т.н., профессор

Люблинский  
Валерий Аркадьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет».

664074, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, д. 40.

Телефон: 8 (3952) 332-008.

www: <http://brstu.ru/>,

E-mail: [rector@brstu.ru](mailto:rector@brstu.ru)

