

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной
работе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Объединённый институт высоких
температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН)

А.В. Гавриков

« 27 » апреля 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Бедновой Вероники Борисовны

«Исследование напряженно-деформированного состояния и разрушения элементов
конструкций при высокотемпературном нагреве с учетом нелинейности
термомеханических свойств материала»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Бедновой В.Б. посвящена разработке нового приближённого аналитического метода расчётов температурных полей и теоретическому исследованию влияния нелинейности теплофизических и механических свойств материалов на напряженно-деформированное состояние и разрушение элементов конструкций при высокотемпературном нагреве. При этом температурные поля определялись на основе нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности, при расчёте упругих напряжений предполагалось выполнение закона Гука, а в пластической области – выполнение условия пластичности Треска. В результате автору удалось, применяя новый подход к решению нелинейных задач термомеханики, получить ряд новых результатов и провести их анализ.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Работа изложена на 109 страницах, список цитируемой литературы содержит 80 источников.

Во введении сформулированы тема и задачи диссертации, и обоснована их актуальность. Проведён аналитический обзор научных публикаций, посвящённых интенсивному тепловому воздействию на конструкционные материалы и вызванных этим термическим деформациям и разрушениям образцов, что соответствует теме диссертации,

и определяет место исследований автора в ряду многочисленных материалов по теме. Особое место уделено результатам проводимых в НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова экспериментов по деградации материалов под действием импульсного лазерного воздействия. Полученные выводы далее частично используются автором диссертации для интерпретации и верификации результатов собственных исследований. Во введении изложены также цели работы, её научная новизна и практическая значимость, методы исследования и положения, выносимые на защиту. Представлен личный вклад автора, достоверность и апробация диссертация.

В первой главе диссертации изложен разработанный Бедновой В.Б. аналитический приближённый метод решения граничных задач для нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности. Метод основан на подходах Баренблатта Г.И. и Шестерикова С.А. к решению линейных задач расчёта температурных полей, в которых проводится выделение температурного фронта по Био М.А., а температура задаётся в виде ряда по базисным функциям. Изложенные в диссертации подходы к решению линейных задач Беднова В.Б. применила далее к решению нелинейных задач с коэффициентами теплопроводности, зависящими от температуры и граничными условиями первого и второго рода, что привело к соответствующему изменению функционального вида аналитического решения. В главе приведено достаточно большое количество решений тестовых задач с разными граничными условиями и коэффициентами теплопроводности: монотонно возрастающими, монотонно убывающими, немонотонными по температуре. Рассматривались одномерные постановки нагрева плоскости и нагрева тонкого диска. Для приближённого решения линейных задач приведено сравнение с точными решениями для граничных условий первого и второго рода. Оценка точности расчётов нелинейных задач проводилась исходя из сохранения теплового баланса. Всюду, где проводилось сравнение с точными решениями, погрешность разработанного в диссертации метода не превосходила 10%, что подтверждает возможность применения этого метода для решения рассмотренного класса задач теплопроводности.

Вторая глава диссертации посвящена определению напряжённо-деформированного состояния материала при высокотемпературном нагреве на основе разработанного автором приближённого метода решения уравнения теплопроводности. Решены задачи о термоупругости при высокотемпературном нагреве образца балочного типа и при высокотемпературном нагреве тонкого диска. Полученные результаты согласуются с имеющимися представлениями о роли нелинейности теплофизических свойств материалов в формировании полей напряжений при неоднородном интенсивном нагреве образцов. Наибольший интерес представляет компьютерное моделирование,

качественно отражающее термоупругое поведение материала при импульсной лазерной обработке элементов конструкций. Так рассчитанная динамика полей напряжений подтвердила наблюдаемую в экспериментах задержку разрушения материалов по отношению к времени окончания лазерного импульса. Особо во второй главе рассмотрена ситуация, когда во время нагрева материал меняет свойства и в разогретой области проявляются свойства пластичности. Проведённые расчёты показали, что появление пластического течения в зоне нагрева приводит к уменьшению максимальных растягивающих напряжений в образце, что сильно влияет на его прочность. Это также согласуется с имеющимися теоретическими и экспериментальными представлениями, что в целом обосновывает применение разработанного в данной диссертации метода к расчёту полей напряжений в нелинейных задачах термомеханики.

В третьей главе диссертации разработанные Бедновой В.Б. методы решения нелинейных уравнений теплопроводности и расчёта термомеханических параметров материалов применены автором к исследованию деформации и разрушения образцов при высокотемпературном нагреве. Решена задача о высокотемпературном нагреве тонкого диска с отверстием в центре и проведено сравнение возникающих напряжений, рассчитанных на основе линейного и нелинейного уравнений теплопроводности. Показано, что учёт зависимости коэффициента теплопроводности от температуры и учёт пластичности материала приводит к уменьшению напряжений в образце, что влияет на его прочность.

В четвёртой главе диссертации приведены результаты расчётов эффективности двух методов предупреждения терморазрушений при быстром нагреве элементов конструкций (образца балочного типа и тонкого диска) лазерным излучением. Исследованы два способа уменьшения температурных напряжений: обдув поверхности образца теплопроводным теплоносителем и механическое преднапряжение. Анализируя результаты расчётов автор делает не вызывающий возражений вывод, что «влияние предложенных методов может быть значительным, но конкретные рекомендации можно дать только в результате проведения соответствующих экспериментов».

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Актуальность темы диссертации. В приведённом в диссертации обзоре литературы достаточно всесторонне отражены технические трудности, связанные с неоднородным разогревом элементов конструкций при высокотемпературном воздействии на материалы при их обработке. Главное внимание в обзоре уделяется лазерной обработке, но можно указать, что такие же трудности возникают при «горячей» имплантации микро- и наночастиц на твёрдотельные подложки и в целом ряде других

новых технологий, потребность в которых всё возрастает. Проблема заключается в том, что имеющие место в этих процессах большие градиенты температур приводят к возникновению больших растягивающих напряжений и разрушению образцов. Таким образом, в настоящее время расчёт температурных полей и термонапряжений в прикладных задачах термоупругости с целью определения оптимальных режимов обработки материалов является весьма актуальным направлением вычислительной физики. Потребность в численных методах для решения такого класса задач довольно очевидна в силу их большой сложности и в настоящее время удовлетворяется многочисленными пакетами прикладных программ, такими как отечественные ELCUT, STRATUM 2000, не говоря уже о зарубежном мощном программном комплексе ANSYS. В этом плане разработанный Бедновой В.Б. приближённый аналитический метод решения задач термомеханики не принадлежит к ведущему направлению разработки математического обеспечения для современных технологий обработки материалов и тем не менее видится также весьма актуальным. Представляются по крайней мере две области, где подход Бедновой В.Б. может быть более эффективен, чем традиционные численные методы. Во первых, решение с применением этого метода задач лабораторного практикума по соответствующей специальности в таких технических университетах, как МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ и других позволит студентам более наглядно и глубоко понять формирование структуры полей термомеханических характеристик и природу разрушения материалов при задании тех или иных инженерных постановок. Во вторых, экономичность метода, требующая для расчётов минимальных затрат компьютерного времени и не принципиальная при решении одномерных задач, может при дальнейшем совершенствовании методики стать решающим фактором при расчёте термомеханики крупномасштабных трёхмерных элементов, что приведёт к созданию на основе разработанного в диссертации подхода новых современных компьютерных кодов решения производственных и конструкторских задач.

Научная новизна работы. Основным новым научным результатом диссертанта является представленный в работе приближённый аналитический метод решения нелинейных уравнений теплопроводности с монотонными и немонотонными зависимостями коэффициента теплопроводности от температуры. Применение разработанного метода к расчёту напряжённо - деформированных состояний материалов при их высокотемпературном нагреве позволил Бедновой В.Б. оценить влияние нелинейных факторов теплопереноса, а также роль дополнительного теплообмена на деформацию и разрушение элементов конструкций.

Достоверность результатов работы обусловлена использованием традиционных классических методов механики сплошных сред и теории дифференциальных уравнений и достоверным сравнением приближённых решений линейных уравнений теплопроводности с точными аналитическими решениями. При этом полученные результаты расчётов нелинейных уравнений полностью соответствуют фундаментальным представлениям о развитии упруго - пластических деформаций при высокотемпературных воздействиях на материалы.

Научная и практическая значимость работы. Исследования Бедновой В.Б. открывают путь для дальнейших разработок всё более эффективных приближённых методов решения задач термомеханики, в частности, путём выбора новых базисных функций, специально адаптированных к фундаментальным свойствам решаемых задач, а также включением разработанного аналитического подхода в численные методы решения динамических задач термической стойкости элементов конструкций. В настоящее время разработанный Бедновой В.Б. метод может служить научной основой при создании программных средств оперативного решения инженерных задач термической деформации и разрушения материалов.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах механико - математического факультета и НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также на российских и международных конференциях.

Публикации. Результаты работы изложены в 7 печатных работах, 3 из которых изданы в журналах, входящих в перечень ВАК. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Личный вклад автора правильно и полно отражён в диссертации и автореферате.

Замечания и пожелания.

1. При тестировании разработанного метода в диссертации приведено сравнение полученных результатов с точными решениями только для линейных уравнений теплопроводности, где эти решения имеются, тогда, как при доказательстве достоверности расчётов нелинейных уравнений автор ограничивается всего лишь качественными оценками. В тоже время для желательной количественной оценке точности нелинейных расчётов следовало бы взять для сопоставления результаты численных решений соответствующих уравнений. Эти данные легко доступны так как представлены в многочисленных публикациях (на пример в хорошо известной книге Тихонова А.Н. и Самарского А.А. "Уравнения математической физики").

2. В диссертации автор решает нелинейные уравнения теплопроводности, задавая абстрактный функциональный вид коэффициентов теплопроводности, не рассматривая соответствие задаваемых коэффициентов реальному виду коэффициентов переноса, что представляется необходимым при углублённом исследовании проблем термомеханики материалов. Было бы правильным привести решение хотя бы одной задачи с термическими характеристиками материала по порядку величины и температурным зависимостям совпадающими с реальными.

3. В заголовке параграфа 2.6 диссертации предполагается сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными по обработке карбида циркония лазерным импульсом. Однако в работе отсутствует количественное сравнение расчётных кривых с данными экспериментов, постановка которых описана в параграфе 1.1 диссертации.

Сделанные замечания, тем не менее, не меняют общей положительной оценки диссертации.

Диссертационная работа Бедновой В.Б. была заслушана и одобрена на научном семинаре Отдела Вычислительной физики Научно-исследовательского центра электрофизики и тепловых процессов Объединённого института высоких температур Российской академии наук 17 апреля 2017 г., протокол № 16.

Диссертация Бедновой В.Б. «Исследование напряженно-деформированного состояния и разрушения элементов конструкций при высокотемпературном нагреве с учетом нелинейности термомеханических свойств материала» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем требованиям п.9 Положения о порядке присуждения учёных степеней №842 от 24.09.2013 г., а её автор Беднова Вероника Борисовна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твёрдого тела.

Заведующий отделом
№4.3 Вычислительной физики,
доктор физико-математических наук,
профессор
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2,
тел. 8 (495) 484-44-33,
электронная почта: ivanov_mf@mail.ru.

М.Ф. Иванов

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Науки Объединённый институт высоких температур РАН
125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, строение 2,
8 (495) 485-79-88, gavrikov@ihed.ras.ru