

ОТЗЫВ

Официального оппонента о диссертации БЕДНОВОЙ ВЕРОНИКИ БОРИСОВНЫ
“Исследование напряжённо-деформированного состояния и разрушения элементов конструкций при высокотемпературном нагреве с учётом нелинейности термомеханических свойств материала”, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела.

Диссертация Бедновой В.Б. посвящена построению методики решения задач о термомеханическом поведении (определение напряжённо-деформированного состояния – НДС) таких элементов конструкций, как балки (стержни) и диски. Работа состоит из Введения, четырёх глав, Заключение, списка литературы (80 названий); объём – 109 страниц.

Актуальность представленной диссертации.

Исследуется НДС элементов конструкций, вызванное высокотемпературным локальным нагревом, например, воздействием на конструкцию лазером. Автор решает задачу в рамках квазистатики, т.е. динамическими эффектами, могущими возникнуть вследствие внезапного возрастания температурных напряжений, пренебрегается.

Актуальность постановки и решения задач о быстром высокотемпературном разогреве конструкционных элементов определяется проблемой возможного внутреннего растрескивания и выхода несущих деталей из строя. Последнее утверждение обосновано результатами многочисленных экспериментов, поставленных в НИИ механики МГУ им. М.В.Ломоносова. По мнению автора, инженерные методики решения подобных задач недостаточно разработаны.

Анализ содержания работы.

Во Введении излагается подробный анализ своевременности разрабатываемой темы, формулируется цель исследования, дан аналитический обзор литературных источников, посвящённых решению нелинейных задач для параболического уравнения (коэффициент теплопроводности существенно зависит от температуры).

В первой главе, “Аналитический приближённый метод решения граничных задач для нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности”, развивается метод решения указанных краевых задач, основанный на понятии температурного фронта (для одномерных задач): прогреваемая конструкция делится на две части, граница между которыми называется температурным фронтом и отделяет часть элемента конструкции, уже прогретую, от части, ещё находящейся при начальной температуре (в диссертации – нулевая температура).

Такой метод решения инженерных задач фильтрации жидкости, названный методом “смены стационарных состояний”, был предложен проф. И.А.Чарным в 1948 г. (кн. Подземная гидромеханика): область движения жидкости, насыщающей пласт, в каждый момент времени разделяется на возмущённую и невозмущённую части; подвижная граница между двумя частями определяется, исходя из уравнений материального баланса и краевых условий.

Эта идея в дальнейшем развивалась в трудах отечественных учёных: Г.И.Баренблатт, С.П.Курдюмов, А.А.Самарский, С.А.Шестериков, А.М.Локощенко и др. внесли значительный вклад в дело продвижения идеи наличия границы, которую принято называть “температурным фронтом”, в практику решения разнообразных прикладных задач.

Автор строит на этой основе сначала приближённый метод решения линейной температурной задачи (с различными краевыми условиями), проверяет адекватность построенных решений классическим результатам (Карлслу и Егер), а затем применяет метод для решения нелинейных задач (коэффициент теплопроводности зависит от температуры: $K(T) = T$, $K(T) = 1 + \rho T$, $K(T) = 1/(1+T)$, $K(T) = 1/(1+T^2)$): исследуются процессы распространения тепла в балочных элементах и дисках. Рассуждения проводятся так, как будто глубина прогретой зоны $L(t)$ уже известна, а

затем для функции $L(t)$, в силу дополнительных условий (например интегральное удовлетворение уравнению теплопроводности), выводится обыкновенное дифференциальное уравнение, решение которого замыкает задачу. Строятся распределения температур (полученные решения), не противоречащие известным решениям о распространении температурных "волн".

Итак, с помощью существенной модификации и усовершенствования идеи температурного фронта, построен приближённый метод решения, в том числе и для нестационарных краевых условий, в виде формул, готовых для инженерных приложений.

Заметим, что автор уделяет основное внимание разработке метода определения температурных полей: первая глава занимает 2/3 объёма диссертационной работы.

В главе 2, "Определение напряжённо-деформированного состояния при высокотемпературном нагреве. Упругое и упругопластическое поведение материала", на основе полученных в главе 1 распределений температуры, при различных предположениях о зависимости $K = K(T)$, решаются задачи несвязанной термоупругости для образцов балочного типа и тонких дисков – плоское напряжённое состояние. Здесь, на мой взгляд, изложена классическая методика определения НДС при воздействии на элемент конструкции нестационарной температуры: на свободное от внешних силовых воздействий твёрдое тело: шарнирно опёртую балку, где стеснение создаётся опорами; кольцевая пластина – стеснение определяется внутренней неизменной радиус окружностью.

Здесь интересен результат исследования: 1) для элемента балочного типа (интенсивное прогревание – на верхней поверхности по всей площади) графики продольных напряжений σ_z (по поперечному сечению, $K(T) = 1$, $K(T) = T$) существенно различаются при $z < 0.7$, проходят через нуль при $z = 0.7$, при $z > 0.7$ практически неразличимы; 2) окружные напряжения σ_ϕ в диске как функции радиальной координаты – также неразличимы.

В этой же главе изложены результаты качественного сравнения полученных теоретических результатов с экспериментами по лазерному воздействию на образцы из карбида циркония (эксперименты проводились в институте механики МГУ). Подтверждён факт задержки (во времени) растрескивания образца после выключения воздействия лазера.

В рамках рассмотрения элементов конструкций из идеально пластического материала изучена возможность пластического течения сильно прогретых элементов.

Глава 3 "Исследование деформирования и разрушения образца при высокотемпературном нагреве". Здесь подробно изучается процесс прогревания тонкого диска с центральным круговым отверстием. Ввиду "тонкости" рассматриваемого конструкционного элемента автор интересуется возможностью выпучивания из первоначальной плоскости – развитием деформаций ϵ_z для случаев зависимостей $K(T) = 1$, $K(T) = 1 - pT$; деформации выпучивания существенно различаются. С точки зрения возможности появления зон разрушения (условием разрушения автор считает достижение окружным напряжением в точке значения $\sigma_\phi = \sigma_p$ – предел пропорциональности на диаграмме $\sigma - \epsilon$). В зонах, где выполнено это условие, происходит "растрескивание", и окружные напряжения более не работают: $\sigma_\phi = 0$. Произведён тщательный анализ состояния тонкого диска и выделены различные зоны НДС. Показано, что учёт нелинейности теплофизических свойств материала и учёт пластичности материала приводят к падению напряжений в диске, что, безусловно, влияет на прочностное состояние образца.

В четвёртой главе, "Методы предупреждения терморазрушений при быстром нагреве", исследованы методы предупреждения термомеханических повреждений при обработке деталей сильными температурными источниками: 1) с помощью обдува поверхности образца, 2) с помощью механического преднагружения приложением дополнительного давления.

В первом случае задача теплопроводности решается с учётом теплообмена на поверхности образца по закону конвективного теплообмена Ньютона. По полученному приближённому

решению задачи теплопроводности температурные поля определяются по выведенным "инженерным" формулам. Во втором случае показано, что при нагреве тонкого диска возможно существенное влияние на уровень напряжённого состояния с помощью дополнительного преднагружения. Для температурной задачи в этом случае ставились краевые условия второго рода.

В Заключении автор подводит итоги выполненной работы и ставит задачи дальнейших исследований.

Замечания по оппонируемой работе.

1. Метод Био приближённого решения, суть которого в составлении функционала, характеризующего состояние исследуемого нагреваемого твердого тела (подобно функционалу действия по Гамильтону), на основании которого ставится вариационная задача, изложен весьма конспективно и нечётко (стр. 21 – 22).
2. Говоря о "температурном фронте", необходимо было сделать ссылку на книгу профессора И.А.Чарного "Подземная гидромеханика", М.– Л.: ОГИЗ, 1948, где впервые для "параболических" задач вводится понятие подвижного фронта (см. соответствующую ссылку в работе Г.И.Баренблатта, цитированной в списке литературы).
3. В тексте диссертации автор называет конечные суммы "рядом", что не соответствует математической терминологии (стр. 30).
4. Не очень понятна логика введения замены переменных (1.29) и последующие формулы для операций дифференцирования – стр. 32. На мой взгляд, вполне можно было обойтись старыми переменными.
5. Вызывают вопросы полученные формулы для температуры $T(x,t)$; например, формула (1.50), где время t в знаменателе (стр. 41). Что происходит с температурой, если $t \rightarrow 0$?
6. В "Выводах по первой главе", (абзац второй): "Метод впервые применён к нелинейному уравнению теплопроводности..." Если это говорится о диссертации, то это неверно!
7. Недоумение вызывает рис. 2.1, стр. 66: "изображён элемент конструкций (цилиндрическая система координат, ось Oz направлена вверх), рассматриваемый в текущем параграфе". На рисунке изображена шарнирно опёртая балка, причём ось Oz направлена вдоль оси балки.
8. Из рисунков 2.2, 2.3 (на каждом показано несколько кривых) непонятно, чему соответствует каждая из них.
9. В формуле (2.27) (выражение для радиального напряжения в пластической области) ограничения для радиуса зоны пластичности следует читать: $1 \leq r < \lambda(t)$.
10. Внимательно рассматривая рисунок 3.1 (стр.83), невольно приходишь к выводу о том, что при заданном потоке на внутренней окружности диска деформация выпучивания имеет бесконечное значение. Так ли это?

Суммируя все свои замечания должен сказать, что текст диссертации недостаточно тщательно отредактирован.

Высказанные выше замечания, однако, не влияют на общую положительную оценку рецензируемой диссертации. Прделана большая и важная исследовательская работа.

Научная новизна.

Новыми результатами считаю:

1. Развитие идеи температурного фронта в задачах нестационарной теплопроводности при различных зависимостях коэффициента теплопроводности $K(t)$ от температуры: Построена единая методика вычисления температурных полей, доведённая до стадии, когда полученные результаты можно применять в инженерных расчётах.

По-моему, в этом главная заслуга автора.

2. Подробно исследованы распределения напряжений и деформаций в рассматриваемых элементах конструкций в термо-упругопластических задачах.

3. Выяснено, как "управлять" распределением температурных напряжений при лазерной обработке элементов конструкций с использованием конвективного теплообмена (обдув изделия), либо воздействием внешних усилий.

Достоверность разработанных в диссертации методов оценки температурных полей и построения на их основе напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций обоснованы корректными математическими выкладками и привлечением экспериментального материала.

Практическая ценность обсуждаемой работы.

Методика использования идея температурного фронта при решении нелинейных задач теплопроводности может быть применена в инженерных расчётах, о чём уже не раз упоминалось выше.

Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на научных семинарах и конференциях различного уровня, отражены в семи публикациях, среди которых имеются 3 публикации в рецензируемых источниках из перечня ВАК.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и результаты исследований автора.

В целом, диссертация Бедновой Вероники Борисовны есть завершённая научная работа, содержащая оригинальные результаты, связанные с решением актуальной научной проблемы. Работа представляет интерес как в теоретическом, так и в практическом отношениях.

Содержание диссертации отвечает паспорту специальности 01.02.04.

Автор проявила себя квалифицированным научным работником, способным решать практически важные задачи с использованием современных математических и вычислительных методов.

Заключение. Диссертация Бедновой Вероники Борисовны является самостоятельной завершённой научно-исследовательской работой. По актуальности, научному уровню, теоретической и практической значимости она удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям, выполненным по специальности 01.02.04. – механика деформируемого твёрдого тела, соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842, а её автор достойна присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

профессор кафедры "Прикладная математика"

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

"Московский государственный технический университет

имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)"

Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники,

д.т.н., профессор

Ванько Вячеслав Иванович.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Тел. 8-499-263-67-19, 263-63-26; e-mail: vvanko@mail.ru

27 апреля 2017 г.



ВЕРНО
ПЕЧАТЬ УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
У ИМ. Н.Э. БАУМАНА
А.Г. МАТВЕЕВ