

Отзыв

официального оппонента о диссертации Смыслова Виталия Андреевича «Методы расчёта остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при температурно-силовом нагружении в условиях ползучести», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Диссертационная работа Смыслова В. А. посвящена разработке методов расчёта формирования остаточных напряжений после процедуры упрочнения и их релаксации вследствие температурной ползучести в сплошных и полых цилиндрических образцах при наличии анизотропии поверхностного пластического упрочнения.

Актуальность разработки этой темы диктуется как чисто прикладными аспектами этой проблемы (например, в энергетическом машиностроении и авиадвигателестроении), так и состоянием дел в теоретическом плане. С одной стороны, хорошо известны проблемы оценки эффективности упрочнения ответственных промышленных элементов конструкций в условиях интенсивного температурно-силового нагружения (диски и лопатки газотурбинных двигателей, защитные оболочки атомных реакторов, различного рода продуктопроводы в энергетической и нефтехимической промышленности и т.д.), сопровождающегося появлением и развитием реологических деформаций. С другой стороны, в имеющейся научной литературе достаточно подробно изучено влияние остаточных напряжений на долговечность конструкций, сопротивление коррозии, растрескивание поверхностного слоя и другие аспекты эксплуатации изделия, но в основном без учёта высоких температур.

Научные публикации, в которых представлены математические модели для оценки кинетики остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом слое элементов конструкций при ползучести, в научной литературе представлены в крайне ограниченном объёме (в основном в научной школе Самарского государственного технического университета). Причин здесь несколько. Хорошо известно, что построение феноменологических моделей реологического деформирования для упрочнённых элементов конструкций требует экспериментальных исследований достаточного большого объёма и большой длительности во времени. Однако изучение рассматриваемой в диссертационной работе проблемы экспериментальным путём в настоящее время выполнить крайне трудно. Это связано с большой длительностью эксперимента на ползучесть и длительную прочность, технической

сложностью проведения непрерывного эксперимента при высоких температурах, отсутствием неразрушающих способов оценки величины остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом слое элементов конструкций в процессе ползучести.

Поэтому автор диссертационной работы выбрал единственно приемлемый, в сложившейся ситуации, способ решения поставленной задачи – это путь математического моделирования с наиболее полным привлечением теоретических возможностей механики деформируемого твёрдого тела, вычислительной математики и вычислительных средств и использованием прямого эксперимента для проверки адекватности ключевых положений разрабатываемых теоретических подходов. Существующие методы оценки формирования напряжённо-деформированного состояния после процедуры упрочнения и релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести разработаны в основном для сплошных цилиндрических образцов и описывают режимы изотропного поверхностного упрочнения. Поэтому естественным образом возникает задача обобщения этих подходов на технологии, приводящие к существенной деформационной анизотропии распределения пластических деформаций в упрочнённом слое детали, на другие элементы конструкций (в частности, полые цилиндрические образцы). Поэтому сформулированные задачи, а также разработка методов решения краевых задач для описания кинетики остаточных напряжений при температурно-силовом нагружении в условиях ползучести – безусловно актуальная проблема, которая в определённой мере (в рамках принятых ограничений и допущений) и разрешается в рецензируемой диссертационной работе.

НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

В соответствии со структурой диссертации научную новизну работы можно оценить по двум основным направлениям: 1) методы оценки формирования остаточных напряжений после процедуры поверхностного пластического упрочнения; 2) постановка новых краевых задач релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых цилиндрических изделиях вследствие ползучести и методы их решения.

Следует отметить, что анализ проблемы оценки остаточных напряжений при их формировании после процедуры упрочнения позволяет сделать вывод, что численно-аналитические методы (например, на основе МКЭ) имеют ряд недостатков и ограничений в их применении. Это связано с погрешностями при введении тех или иных механических гипотез, решении краевых задач, невозможность знать точные механические характеристики материала и

внешних силовых и температурных нагрузок в процессе упрочнения и многими другими причинами. В этом плане феноменологические методы, рассмотренные и реализованные в диссертационной работе В. А. Смыслова, более предпочтительны, так как здесь имеется частичная экспериментальная информация о тензоре остаточных напряжений, что является реперной точкой в разработке соответствующей методики восстановления НДС в упрочнённом слое. Привлекательность этого подхода состоит в том, что в упрочнённом слое полностью восстанавливается напряжённо-деформированное состояние после процедуры упрочнения, а это, в свою очередь, позволяет решать краевые задачи кинетики остаточных напряжений в условиях температурно-силового нагружения (например, при наличии деформации ползучести) с заданным начальным распределением полей остаточных пластических деформаций и остаточных напряжений.

Элементы новизны содержит феноменологический метод расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в полом цилиндрическом образце, обобщающий соответствующую методику для сплошных цилиндрических изделий и позволяющий учитывать деформационную анизотропию процесса упрочнения. Несмотря на аналогию, краевая задача для полого цилиндра имеет совершенно другой вид, чем для сплошного цилиндра. Отличие состоит и в граничных условиях, и в характере распределения компонент тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций, и в нетривиальной методике идентификации параметров модели. Автором диссертации выполнено глубокое исследование влияния введённого параметра анизотропии упрочнения на характер распределения осевых и окружных компонент остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах, и установлен факт существенного их расслоения при возрастании значения параметра анизотропии, что впервые теоретически объясняет соответствующий наблюдаемый экспериментальный факт.

Вторая часть работы Смыслова В. А. связана с разработкой методов решения нового класса краевых задач оценки кинетики остаточных напряжений вследствие ползучести в сплошных и полых цилиндрических образцах с начальным заданным напряжённо-деформированным состоянием (после процедуры упрочнения). И эта задача корректно и однозначно может быть решена, только если начальные поля напряжений и деформаций, во-первых, строго удовлетворяют соответственно уравнениям равновесия, совместности деформаций, начальным и граничным условиям, во-вторых, они заданы по всему объёму интегрирования. И обе эти проблемы успешно разрешены диссертантом в решении первой задачи – формировании полей

после процедуры упрочнения. Это также можно отнести к существенным элементам новизны работы.

В диссертационном исследовании соискателем впервые выполнена комплексная экспериментальная проверка предложенных математических моделей восстановления и релаксации остаточных напряжений. С одной стороны, это можно рассматривать как элемент новизны работы, а с другой стороны, экспериментальные данные расширяют существующую эмпирическую базу данных по этой проблеме.

В экспериментальном плане заслуживают внимания исследования по проверке адекватности метода расчёта релаксации остаточных напряжений в полом цилиндрическом образце в условиях температурных выдержек (чисто температурное нагружение), в которых диссертант синтезировал существующие экспериментальные данные других авторов по определению остаточных напряжений после термоэкспозиции и данные по ползучести материалов для построения соответствующей реологической модели. Кроме этого диссертантом впервые теоретически и экспериментально выполнены исследования по влиянию растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в сплошном цилиндрическом образце и получен нетривиальный результат: в определённом временном интервале приложение нагрузки ведёт к снижению скорости релаксации остаточных напряжений по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции.

Следует отметить разработанное (и зарегистрированное) программное обеспечение, аналогов которого в механике упрочнённых конструкций не имеется. В частности, кроме соответствующего модуля для термопластического упрочнения, для других процедур упрочнения отсутствуют соответствующие модули даже в таких мощных вычислительных комплексах как ANSYS.

В целом с пунктами «научная новизна» и «на защиту выносятся» автореферата и диссертации можно согласиться.

СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ. Все основные положения, выносимые на защиту, являются обоснованными, так как они логически вытекают из поставленной диссертантом цели: разработка методов формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом слое сплошных и полых цилиндрических изделий при ползучести в условиях температурно-силового нагружения.

Математическая корректность результатов основана на использовании классических соотношений механики деформируемого твёрдого тела и

корректным применением математического аппарата и вычислительных технологий. Большинство решений краевых задач в диссертационной работе сравнивается на адекватность результатов с известными асимптотическими решениями и экспериментальными данными. В работе широко использовались апостериорные оценки погрешности и сходимости вычислительных алгоритмов. Приведенные результаты расчетов представляются убедительными и допускают понятную с теоретической и практической точек зрения интерпретацию.

ЗНАЧИМОСТЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ДЛЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ. Полученные автором результаты имеют существенное научное и практическое значение. С одной стороны, они представляют заметный вклад в решение нового класса краевых задач с начальным напряжённо-деформированным состоянием для оценки кинетики остаточных напряжений при ползучести, с другой стороны, дается инструмент для решения важных практических задач по оценке ресурса элементов конструкций с поверхностно-упрочненным слоем, в частности, для деталей газотурбинных двигателей.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Работа имеет фундаментальный характер, её основные результаты достаточно полно изложены в 21 работе, 4 статьи из которых опубликованы в изданиях из перечня ВАК, докладывались на Международных и Всероссийских конференциях различного уровня, научных семинарах. Считаю, что работа В. А. Смылова в достаточной мере апробирована.

Содержание диссертации полностью отражено в автореферате. Существенных замечаний по оформлению автореферата и диссертации не имеется. Содержание диссертации изложено ясным и понятным научным и литературным языком.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТЫ.

1. При упрочнении поверхностным пластическим деформированием, в частности при обкатке роликом, пневмо- и гидродробеструйной обработке и других технологиях, в поверхностном слое создаются остаточные сжимающие напряжения, однако наряду с этим, по-видимому, изменяются и свойства материала в упрочнённом слое, например, за счёт измельчения зерна и других факторов. Учитывались ли эти изменения механических характеристик при решении краевых задач ползучести, из диссертации не ясно.

2. К сожалению, диссертант не обременяет себя обоснованием ряда введённых гипотез. Так, не понятно, имелись ли какие-либо теоретические или экспериментальные предпосылки для введения гипотезы (2.8) (стр. 49

диссертации) относительно параметра анизотропии; введения аппроксимационных формул (1.12) и (2.26) диссертации.

3. В таблицах 2.1 и 2.2 диссертации приведены погрешности отклонения Δ_{θ} и Δ_z расчётных значений компонент тензора остаточных напряжений от соответствующих экспериментальных значений. И если для случая изотропного упрочнения ($\alpha=1$) эти погрешности лишь 10%, то для анизотропной процедуры упрочнения ($\alpha \neq 1$) эта величина может достичь 20% и более. Чем объясняется увеличение погрешности во втором случае? Нельзя ли погрешность уменьшить за счёт, например, увеличения параметров аппроксимаций (1.12), (2.26)?

4. В главе 3 приводится задача пересчёта остаточных напряжений при температурной нагрузке (разгрузке) и предполагается, что прогрев (остывание) образца произошёл мгновенно, что противоречит физической картине процесса. Здесь за счёт неоднородного температурного поля, возникающего на стадии неустановившегося температурного процесса (в зависимости от его длительности), могут возникать и деформации ползучести, и неоднородные температурные деформации, которые могут существенно «исказить» поля напряжений.

5. При проведении экспериментальных исследований по влиянию растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в упрочнённом сплошном цилиндрическом образце основное внимание уделено измерению остаточных напряжений после температурно-временных выдержек. Экспериментальные же данные для построения модели ползучести для ЖС6КП при $T = 800^\circ\text{C}$ были позаимствованы из независимых источников – публикаций других авторов. Однако, учитывая, что упрочнённый слой тонкий и практически не влияет на осевую ползучесть образца, можно было одновременно в испытаниях при действии растягивающей нагрузки получить и кривые одноосной ползучести для построения реологической модели. Но эта возможность диссертантом не использована.

Замечаний по оформлению диссертаций и автореферата не имеется.

Указанные замечания не являются существенными и не снижают общего положительного впечатления о работе. Диссертационная работа Смыслова В. А. выполнена на высоком научно-методическом уровне и вносит достаточно весомый вклад в развитие рассматриваемой проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ. Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненным соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Полученные результаты достоверны, выводы и

умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объёме полученных экспериментальных и теоретических результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твёрдого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа В. А. Смылова «Методы расчёта остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при температурно-силовом нагружении в условиях ползучести» является завершённым научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне, соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела», имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» п.9. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям, а её автор – Виталий Андреевич Смыслов – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

профессор кафедры «Прикладная математика и информатика»
Комсомольского-на-Амуре
государственного технического университета,
доктор физико-математических наук (01.02.04),
профессор



Хромов А. И.

Подпись Александра Игоревича Хромова заверяю

Ученый секретарь КнАГТУ,
кандидат технических наук, доцент



Шишкин Б. В.

16 февраля 2015 года

Служебный телефон:
8 (4217) 549-538
E-mail: khromovai@list.ru

Служебный адрес:
681013, г. Комсомольск-на-Амуре
Хабаровского края, пр-т Ленина, 27,
корпус 3 КнАГТУ,
кафедра «Прикладная математика и информатика»