

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Цветкова Виталия Владимировича на тему «Краевые задачи ползучести
поверхностно упрочненных цилиндров при различных видах
квазистатического нагружения», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 –
механика деформируемого твердого тела

1. Структура и оформление диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка источников из 189 наименований, содержит 195 страниц текста, включая 51 рисунок и 26 таблиц, и три приложения. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

2. Актуальность темы диссертации.

Задача прогнозирования ресурса поверхностно упрочненных деталей авиационного двигателя, работающих во все более ужесточающихся условиях температурно-силовых воздействий, является актуальной для создания новых изделий с повышенными показателями надежности эксплуатации. Ползучесть в этих условиях ведет к замысловатому перераспределению поля остаточных деформаций и напряжений в изделии в зависимости от вида нагружения и к релаксации поверхностных остаточных напряжений, определяющих усталостную долговечность. Поэтому описание процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных деталях машин при различных комбинированных видах температурно-силового нагружения требует создания математической модели протекания неоднородных реологических процессов во всем объеме изделия, разработки методологии экспериментального подтверждения получаемых результатов и представляет собой довольно сложную и актуальную проблему.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.

Автором разработан метод решения краевой задачи о реологическом деформировании и разрушении цилиндрических тел при различных видах квазистатического температурно-силового нагружения (термоэкспозиция, осевое растяжение, крутящий момент, внутреннее давление и их комбинации), который максимально просто трансформируется в инженерную методику расчета данных процессов путем последовательного определения неизвестных полей с помощью явных аналитических выражений.

Данный метод без принципиальных усложнений был модернизирован для учета начального распределения остаточных напряжений в поверхностном слое.

Автором предложено обобщение модели ползучести и длительной прочности энергетического типа на случай жаропрочных металлических сплавов, используемых в авиационном двигателестроении, проявляющих немизесовость свойств, удовлетворительно описывающее известные экспериментальные данные.

Главным новым и нетривиальным научным результатом работы является теоретическое предсказание ускорения релаксации поверхностных остаточных напряжений в цилиндрических металлических образцах при высоких температурах при действии комбинированного силового нагружения за счет перераспределения деформаций ползучести, полученное с помощью нелинейной модели кинетики напряженно-деформированного состояния.

Эти основные результаты диссертации фактически указаны в автореферате в качестве положений, выносимых на защиту.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Метод расчета релаксации остаточных напряжений при высоких температурах в поверхностно упрочненных цилиндрических изделиях при комбинированных видах нагружения имеет большую практическую значимость для конструирования авиационных двигателей и турбин с высокими требованиями по прочности и внедрен на ПАО «Кузнецов».

Рассмотренные автором сплошные и полые круговые цилиндры являются оптимальным объектом изучения как с экспериментально-методической точки зрения, так и с точки зрения практических приложений. Автор усовершенствовал модель ползучести и длительной прочности Ю.П.Самариным и В.П.Радченко, учитывающую связанные процессы ползучести (на всех трех стадиях), повреждаемости и разрушения, верифицированную на процессах высокотемпературного нагружения образца с простыми напряженными состояниями и хорошо зарекомендовавшую себя при описании долговечности деталей машин.

5. Достоверность результатов диссертации.

Адекватность используемых математических моделей ползучести и разрушения, а также полученных автором решений на каждом логически завершеном этапе работы проверялась сопоставлением с множеством опубликованных в научной литературе экспериментальных данных для различных материалов, простых и сложных напряженных состояний, наличия или отсутствия поверхностного упрочнения.

6. Апробация работы. Диссертационная работа В.В. Цветкова в достаточной мере опубликована и апробирована. Основные положения работы опубликованы в шести научных журналах из перечня ВАК (в том числе входящих в международные системы цитирования) и докладывалась на пятнадцати международных и всероссийских конференциях по профилю механики деформируемого твердого тела. Полностью работа докладывалась на профильных научных семинарах. Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ, результаты которых проходят полноценную научную экспертизу.

7. Вопросы и замечания по содержанию работы.

Диссертация В.В. Цветкова как содержательная научная работа порождает и продолжает ряд дискуссий по вопросам, которые шире ее самой, но по которым, однако, точку зрения соискателя хотелось бы знать.

1. Для восстановления напряженно-деформированного состояния в (для определенности) полом упругом цилиндре по известному из лабораторных исследований профилю тангенциальной компоненты напряжений $\sigma_0^{res}(r)$ в

тонком приповерхностном слое автор использует методику, согласно которой известное распределение компоненты напряжений продолжается на всю толщину цилиндра с использованием некоторой экстраполяции и условия $\int_{R_1}^{R_2} \sigma_{\theta}^{res}(r) dr = 0$, в результате чего уравнения задачи дают выражение

(1.2). Относительно используемого метода необходимо заметить, что

а) анализ выражения (1.2) и результаты расчета по нему (рис.4.5а, 4.6а, 4.7а, 4.8а) сообщают, что в этом выражении уже заложено довольно произвольное условие $\sigma_{\theta}^{res}(R_1) = 0$, принятое в аппроксимации (1.8), противоречащее точному решению рассматриваемой задачи;

б) функциональный базис аппроксимации поля $\sigma_{\theta}^{res}(r)$ вне слоя, где оно известно, вообще говоря появляется из зависимости $\sigma_{\theta}^{res}(r)$ от $q_{\theta}(r)$ в рамках точного решения задачи; в рамках используемого метода на восстанавливаемый профиль пластической деформации $q_{\theta}(r)$ не накладывается никаких ограничений относительно того, что ненулевые значения этого поля локализованы в тонком приповерхностном слое, в котором известен профиль остаточных напряжений $\sigma_{\theta}^{res}(r)$, что допускает некоторый произвол его продолжения на всю толщину полого цилиндра за счет искажения профиля $q_{\theta}(r)$ в этой области (см. рис.4.5г), лишаящего его смысла как слоя пластических деформаций, вызванных обработкой внешней поверхности цилиндра.

Использованная диссертантом методика решения задачи в отличие от ее точного решения (в рамках которого невозможно построить явную аналитическую зависимость $q_{\theta}(r)$ от $\sigma_{\theta}^{res}(r)$) ведет к последовательности явных аналитических выражений и дружественна к конструкторам-прочнистам, но, вероятно, может вызывать количественные и даже качественные (см. область с растягивающими пластическими деформациями на рис.4.5г) разногласия с экспериментом.

2. Различие нелинейных тензорных свойств в зависимости от вида напряженного состояния (одноосное растяжение, сдвиг) может быть вызвано

не деформационной анизотропией (о чем говорится в п.2.4), а зависимостью от параметра трехосности (показателя напряженного состояния) и угла вида. В рамках предлагаемой автором версии обобщения модели феноменологическую причину этого различия установить невозможно ввиду непоследовательного учета этих эффектов при обобщении определяющих уравнений: а) уравнение для параметра поврежденности (2.59) учитывает объемную часть тензора деформаций ползучести, но сам закон ползучести (2.57) ее не определяет; б) в законе ползучести (2.57) учтена зависимость «векторных свойств» от вида напряженного состояния, но «скалярные свойства» положены функциями интенсивности напряжений; в) модель ползучести, повреждаемости и разрушения (2.57)-(2.61) зависит от выбора базиса в точке пространства, что заставляет использовать ее с известной осторожностью. Альтернативный путь формулировки модели мог бы состоять в последовательном построении потенциала ползучести и функционалов повреждаемости и разрушения через полную систему скалярных инвариантов тензора напряжений и тензора, задающего анизотропию, при необходимости.

3. Как можно резюмировать механизм исчезновения поверхностных остаточных напряжений в процессе ползучести нагруженного образца из анализа решенных автором задач? Можно ли утверждать, что (например) при одноосном растяжении трубы упругие напряжения внешней нагрузки, суммируясь с остаточными напряжениями, приводят к более интенсивному росту деформаций ползучести в областях с меньшими по абсолютному значению остаточными пластическими деформациями (и, соответственно, большими напряжениями), что ведет к выравниванию остаточных деформаций и напряжений по сечению образца? Если понимание оппонента в этом вопросе верно, то какова причина интенсификации процесса при сложном напряженном состоянии? Большую ясность в последний вопрос можно было бы внести, если бы соискатель в процессе расчета предсказаний скорости релаксации остаточных напряжений в зависимости от вида напряженного состояния практиковал методику виртуальных испытаний

тонкостенных трубчатых образцов, в которых сравниваемые комбинации осевой силы и крутящего момента соответствовали бы фиксированной интенсивности напряжений.

Есть еще ряд небольших замечаний и комментариев по содержанию работы.

4. На стр.16 имеется утверждение «согласно уравнению равновесия после процедуры упрочнения сумма проекций всех сил на координатные оси равна нулю, поэтому в упрочненной детали всегда имеются области с отрицательными и положительными остаточными напряжениями», контрпримером к которому является распределение остаточных напряжений, вызванных слоем пластических деформаций вблизи границы упругого полупространства.

5. К обсуждению метода внесения в расчетную область остаточных напряжений заданием подходящего поля фиктивных температурных деформаций (стр. 25-26) следует добавить возможность задания анизотропных коэффициентов линейного температурного расширения произвольного знака (имеющуюся, например, в пакете ANSYS), что существенно расширяет границы метода.

6. Заметим, что само уравнение (2.4) и гипотезы (2.5)-(2.6) суть следствия уравнений совместности деформаций и гипотезы об осесимметричности поля деформаций и его однородности вдоль оси цилиндра.

8. Заключение по диссертации.

Квалификация автора диссертации как научного работника в области механики деформируемого твердого тела соответствует степени кандидата физико-математических наук. Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно на достаточно высоком научном уровне. Полученные результаты достоверны, выводы обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме новых содержательных теоретических

результатов, которые вносят заметный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела.

Полагаю, что диссертационная работа Цветкова Виталия Владимировича на тему «Краевые задачи ползучести поверхностно упрочненных цилиндров при различных видах квазистатического нагружения», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является завершённым научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне, соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» и имеет важное научное и практическое значение. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.03.2013 года (в редакции от 28.08.2017 года), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

научный сотрудник лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) — филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04), доцент

Келлер Илья Эрнстович

Служебный телефон: +7(342)2378307 E-mail: kie@icmm.ru

Служебный адрес: 614013, г.Пермь, ул. Акад. Королёва, д.1, ИМСС УрО РАН

Подпись И.Э. Келлера заверяю
Ученый секретарь ИМСС УрО РАН,
кандидат физико-математических наук



Юрлова Н.А.

4 июня 2018 года