

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Морозова Андрея Павловича

«Стохастические модели релаксации остаточных напряжений и кинетика микротвердости материала в поверхностно упрочненных элементах конструкций в условиях ползучести», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность

Практика и эксплуатация элементов конструкций в различных областях промышленности ставят перед исследователями задачу обеспечения высокой надежности и прочности изделий, работающих при высоких температурах, при наложении ограничений на материалоемкость деталей. По всей видимости, конструкторские методы обеспечения прочности и надежности уже исчерпали свои возможности, поэтому на первый план выходят технологические методы повышения ресурса изделий, к которым относятся методы поверхностного пластического деформирования (дробеструйная, гидро- и пескоструйная обработка поверхности, выглаживание, обкатка роликом, ультразвуковое упрочнение и др.) В частности, при производстве авиационных деталей от 20 до 70% деталей подвергаются различным видам упрочняющих технологий, которые в тонком приповерхностном слое создают поле сжимающих остаточных напряжений, препятствующее выходу различного рода вакансий на поверхность деталей, а разрушение детали начинается с ее поверхности и инициируется процессами растрескивания материала, внедрением других твердых и жидких сред (как правило, агрессивных) в поверхность материала, диффузии и другими эффектами. Эта проблема многократно усложняется в условиях высокотемпературного многоциклового нагружения. Увеличение ресурса детали и элементов конструкции на макроуровне в механике сплошной среды как раз и связывается с наличием поля технологических сжимающих остаточных напряжений.

Однако при эксплуатации деталей и элементов конструкций при высоких температурах вследствие явления ползучести наблюдается процесс релаксации остаточных напряжений. Этот процесс приводит к снижению положительного эффекта, достигаемого за счет упрочнения. Поэтому оценка кинетики напряженно-деформированного состояния в упрочненном слое деталей и элементов конструкций, работающих в условиях высоких температур, является ключевой задачей уже на стадии проектирования таких изделий. Решение этой задачи усугубляется тем, что высокотемпературные реологические деформации имеют ярко выраженный стохастический характер, что приводит к разбросу данных, например, при оценке кинетики остаточных напряжений. Поскольку повышение ресурса упрочненных деталей связывается с качеством поверхностного слоя, то кроме подходов механики деформируемого твердого тела необходимо исследование и металлофизических характеристик в упрочненном слое, параметров поверхности (микротвердости, шероховатости и т.д.) Такого рода комплексные, в определенном смысле –

междисциплинарные, исследования позволяют более глубоко понять суть исследуемой проблемы.

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что актуальность проблем, на решение которых направлена настоящая диссертационная работа, диктуется как потребностями прикладных задач, например, авиадвигателестроения, энергомашиностроения и других отраслей, так и дальнейшим развитием теоретических подходов к постановкам и методам решения краевых задач технологической направленности. В частности, представляют интерес стохастические краевые задачи для расчета кинетики остаточных напряжений в условиях ползучести, так как именно с ними, как правило, связаны критериальные зависимости по оценке увеличения усталостной прочности.

Научная новизна исследований и результатов

Прежде чем перейти к оценке новизны полученных результатов, отметим следующее. В настоящее время подавляющее большинство подходов решения задач для поверхностно упрочненных изделий в различных температурно-силовых условиях в отечественной и зарубежной практике носят сугубо экспериментальный характер с преобладанием разрушающих методов. Такой путь решения проблемы является весьма затратным, а разработка расчетных или расчетно-экспериментальных методов на основании математических и физических моделей выглядит перспективным направлением. Так, его развитие позволяет расчетным путем прогнозировать процессы релаксации, усталостной прочности и другие характеристики в упрочненных деталях, сводя к оптимальному минимуму экспериментальные лабораторные исследования (в некоторых случаях – стендовые испытания изделий), либо же разработать оптимальный план стендовых испытаний. И если методы восстановления (реконструкции) остаточных напряжений после процедуры упрочнения для цилиндрических и плоских деталей уже разработаны, то методы решения задач релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести требуют своего развития не только в детерминированной, но и в стохастической постановке. С точки зрения диагностики уровня остаточных напряжений важную роль играют экспериментальные и расчетные методы оценки кинетики микротвердости в процессе ползучести упрочненных деталей. Именно в рамках сформулированных проблем и рассмотрим элементы новизны рецензируемой диссертационной работы.

1. Соискателем впервые поставлена задача решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностного упрочненного полого цилиндра в условиях осевого растяжения и предложен способ ее решения на основе использования метода статистических испытаний (метода Монте-Карло). Использование предложенного подхода позволяет расчетным путем прогнозировать эволюцию напряженно-деформированного состояния в вероятностной постановке. С одной стороны, – это важный самостоятельный результат. С другой стороны, появляется возможность теоретически спланировать реперные «точки» для проведения, например, средств экспериментального контроля уровня остаточных напряжений в условиях ползучести. Наконец, вероятностные характеристики полей остаточных напряжений позволяют выйти на оценку надежности упрочненного изделия, когда в качестве соответствующего

параметра выступает величина остаточных напряжений в какой-либо точке (например, на поверхности изделия).

2. Реализация метода решения краевой стохастической задачи ползучести упрочненного цилиндра невозможна без построения стохастической феноменологической модели ползучести и соответствующего определяющего эксперимента. В этом плане отметим уникальные эксперименты по исследованию распределения деформации ползучести по длине упрочненного образца, на основании которых и построена стохастическая модель ползучести для сплава Д16Т при $T = 125$ °С. Здесь диссертантом предложена оригинальная методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа экспериментальных данных локальных реологических деформаций в пределах одного образца. Это позволило всего по 4 образцам построить выборки случайных величин из 34 реализаций. При классическом подходе необходимо было бы выполнить экспериментальные исследования для получения этой же информации для 34 образцов, при этом замеряется среднеинтегральная величина деформации ползучести по рабочей части образца, которая не отражает реальные флуктуации реологической деформации в пределах образца.

3. Впервые выполнен комплексный теоретико-экспериментальный анализ ползучести упрочненных цилиндрических и плоских деталей с позиции механики деформируемого твердого тела в совокупности с исследованием физико-механических параметров (микротвердости и шероховатости) упрочненной поверхности деталей и структуры металла по глубине упрочненного слоя. В этом плане отметим, что повышение микротвердости упрочненных деталей по сравнению с неупрочненными, а также падение микротвердости в упрочненных деталях в процессе высокотемпературной выдержки, – это известные экспериментально наблюдаемые факты, которые, однако, не получили должной теоретической оценки с позиций механики деформируемого твердого тела. В своей работе соискатель связал повышение микротвердости после упрочнения и ее падение до состояния неупрочненных образцов с наличием остаточных напряжений и их релаксацией в процессе ползучести в условиях температурно-силового нагружения, а не с изменением структуры металла после упрочнения, и убедительно экспериментально обосновал это предположение. При этом разработан теоретический метод решения краевых задач ползучести с начальным напряженно-деформированным состоянием для упрочненного полого цилиндрического образца при осевом растяжении в стохастической постановке.

4. Самостоятельный интерес представляет широкий спектр экспериментальных исследований по влиянию режимов упрочнения, температурно-силовых квазистатических нагрузок, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику остаточных напряжений, микроструктуры и физико-механических характеристик поверхностного слоя. Эти данные в значительной мере повышают знания о поведении упрочненных деталей из сплавов В95, Д16Т, ЭИ698ВД, стали 20 и, несомненно, будут полезны в инженерной практике.

5. Отметим новые и несколько неожиданные результаты по исследованию влияния поверхностного упрочнения и многоциклового нагружения на микротвердость цилиндрических деталей с галтелью (пункт 5.4 диссертации). В частности, выявлено, что на всех образцах после испытаний на усталость наблюдается монотонное снижение значений микротвердости от зоны разрушения до основания образца, причем, чем больше

величина радиуса галтели, тем меньше значение микротвердости в зоне разрушения. Этот результат позволяет косвенно, по измерению микротвердости, определять положение опасного сечения в упрочненных образцах с галтельным переходом. Непонятно, почему соискатель не отметил этот результат в выводах и научно «новизне».

Анализ диссертационной работы позволяет сделать вывод, что все заявленные в научной новизне положения действительно реализованы соискателем и соответствуют «паспорту» специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Теоретическая и практическая значимость работы

По существу полученных диссертантом результатов можно резюмировать следующее. Соискателем разработан метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в полом упрочненном цилиндрическом образце в стохастической постановке в процессе ползучести как в условиях термоэкспозиции (температурной выдержки без нагрузки), так и при осевом растяжении образца. Применение этого метода позволяет расчетным путем оценивать степень эффективности наведенных остаточных напряжений в условиях температурно-силового нагружения, не прибегая к трудоемким экспериментальным исследованиям. Заслуживает внимания разработанная методика идентификации случайных величин в стохастических уравнениях ползучести, которая позволяет существенно (в несколько раз) сократить объем определяющего эксперимента.

С точки зрения практики самостоятельное значение имеют выполненные комплексные экспериментальные исследования по установлению корреляционных связей между остаточными напряжениями и структурным состоянием материала в упрочненных плоских деталях в условиях ползучести и многоциклового нагружения, позволяющие пополнить соответствующую информационную базу данных для исследованных деталей из соответствующих материалов. Приведены акты внедрения научных результатов в учебном процессе СамГТУ и в расчетную практику одного из ведущих авиапредприятий – ПАО «Кузнецов».

Апробация работы

Работа Морозова А.П. прошла достаточно широкую апробацию, ее положения опубликованы в 56 печатных работах (из них 6 публикаций в журналах из перечня ВАК и 1 публикация в журнале из базы «Scopus»), имеется большое число выступлений на конференциях различного уровня и научных семинарах. Частично результаты работы были получены в рамках выполнения ряда проектов Минобрнауки РФ и грантов РФФИ, где имеет место достаточно жесткая экспертиза проектов. Поэтому считаю, что работа Морозова А.П. прошла достаточно многостороннюю апробацию.

Диссертация и автореферат написаны ясным и понятным языком. Автореферат в целом отражает содержание диссертации, существенных замечаний по их оформлению не имеется.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и адекватность результатов подтверждается тем, что диссертант использовал широко известные и апробированные методы экспериментальных исследований остаточных напряжений, микротвердости, шероховатости и структуры металла в упрочненных изделиях в соответствии с существующими методиками ГОСТов, использованием

классических уравнений механики деформируемого твердого тела, корректным применением математического аппарата и программного обеспечения, сравнением результатов расчета с данными экспериментальных исследований, выполненных соискателем, в частных случаях. Результаты исследований не противоречат имеющимся в научной литературе.

Вместе с тем по диссертации имеются замечания:

1. В работе четко не обоснованы: выбор материалов и геометрических параметров образцов, технологии упрочнения, температурных режимов нагружения, режимов испытаний на ползучесть упрочненных образцов. Чем продиктован именно такой цикл экспериментальных исследований для образцов из сплава Д16Т при $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$?

2. Работа, в частности, посвящена реконструкции напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического деформирования и последующей релаксации остаточных напряжений. Но моделирование поверхностного пластического деформирования сводится фактически к контактной задаче упругопластического деформирования. Как ни странно, предел текучести, диаграмма упругопластического деформирования вообще не входят в число параметров рассмотренных диссертантом моделей.

3. Диссертантом не сформулированы границы применимости предложенных методик и в явном виде не приведены оценки погрешностей, возникающих при экспериментальном и теоретическом исследовании остаточных напряжений. Не исследован вопрос влияния краевых эффектов торцов упрочненных деталей на формирование и релаксацию остаточных напряжений, нет оценки величины области краевого эффекта, что важно в прикладных задачах.

4. В диссертации приведены графики для кинетики осевой компоненты тензора остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ в процессе ползучести упрочненного цилиндрического образца (рис. 4.4 – 4.7). Для полноты картины интерес представляет и кинетика других компонент тензора остаточных напряжений: окружной и радиальной. Однако данная информация в исследовании не представлена.

5. Для определения характера распределения деформации ползучести в работе использован механический способ – кернение вдоль образующей цилиндра. Но в процессе ползучести первоначально круговые конусы трансформируются в конусы с эллиптическим поперечным сечением. К сожалению, в работе не приведена подробно методика, по которой измерялись перемещения между соседними опорными кернами. Кроме этого нужно учитывать, что нанесение керна приводит к последующей концентрации напряжений в прилегающей области. Никаких комментариев на этот счет в диссертации не имеется.

6. В четвертой главе изложен численный метод решения краевой задачи ползучести упрочненного полого цилиндра «шагами по времени». Но это циклический вычислительный итерационный процесс, а в диссертации не затронуты вопросы выбора шага интегрирования и сходимости процесса.

Заключение по диссертации

Отмеченные недостатки носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку работы. В целом же, исходя из содержания диссертации Морозова А.П. «Стохастические модели релаксации остаточных напряжений и кинетика микротвердости материала в поверхностно упрочненных элементах конструкций в условиях ползучести», можно сделать вывод, что она является законченной научно-исследовательской работой, выполненной самостоятельно и вносящей существенный вклад в теорию и практику механики упрочненных конструкций.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа А.П. Морозова «Стохастические модели релаксации остаточных напряжений и кинетика микротвердости материала в поверхностно упрочненных элементах конструкций в условиях ползучести» является завершенным научным исследованием, выполненном на высоком научно-техническом уровне, соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела», имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней». Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Морозов Андрей Павлович – заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Прикладная математика,
информатика и информационные системы»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
университет путей сообщения»,
доктор технических наук (01.02.04),
доцент

Ермоленко Георгий Юрьевич

«9» октября 2017 г.
email: Georgy12@yandex.ru
тел. служебный: (846) 255-67-15
служебный адрес: 443066, г.Самара, Первый Безымянный переулок 18
Подпись Ермоленко Г.Ю. заверяю:
Ученый секретарь ФГБОУ ВО
«Самарский государственный
университет путей сообщения»



Ляшенко Виктория Владимировна