

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Шишкина Дмитрия Михайловича на тему «Методы расчета
остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических деталях
с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

1. Структура и объем диссертации. На отзыв представлены диссертационная работа и автореферат. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы из 158 наименований и двух приложений. Содержит 168 страниц текста, включая 66 рисунков, 4 таблиц. По объему и структуре работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» к оформлению диссертаций. Изложение диссертационной работы соответствует заявленной теме и подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность. Основная проблема современной науки и инженерной практики в машиностроении, энергетическом и аэрокосмическом промышленных комплексах состоит в повышении показателей эксплуатационной надёжности при одновременном снижении материлоёмкости, энергетических и экономических затрат и ужесточении температурно-силовых режимов нагружения элементов конструкций.

Разрушение деталей при эксплуатации, как правило, начинается с поверхности вследствие того, что поверхностные слои оказываются наиболее нагруженными при всех видах напряженного состояния и подвергаются активному воздействию внешней среды.

Как известно, сопротивление усталости и других механических параметров основных силовых деталей двигателя можно повысить металлургическими, конструктивными, технологическими и эксплуатационными методами, причем технологические методы, например поверхностного пластического деформирования, являются наиболее эффективными, поскольку, во-первых, не увеличивают материлоёмкость деталей, во-вторых, практически не влияют на геометрические параметры обрабатываемого изделия.

Повышение требований к надежности и долговечности конструкций приводит к использованию различных упрочняющих обработок поверхности деталей для создания в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений. Они позволяют, например, повысить нижнюю границу предела выносливости.

Подавляющее большинство работ в области механики упрочнения при нормальной температуре носит чисто экспериментальный характер, при этом определяются не все компоненты тензора остаточных напряжений в слое, а лишь некоторые эквивалентные характеристики напряженного состояния. Методы определения остаточных пластических деформаций в упрочненном слое вообще оказываются за рамками существующих и экспериментальных, и, для подавляющего большинства, расчетных методов механики упрочненных конструкций. Но для решения, например, краевых задач кинетики наведенных после процесса упрочнения остаточных напряжений при действии температурно-силовых нагрузок в условиях ползучести даже с использованием стандартных вычислительных пакетов, необходимо иметь начальное напряженно-деформированное состояние в упрочненном слое. Отсюда естественным образом следует актуальность задачи определения полной картины для тензоров остаточных напряжений и остаточных пластических деформаций по глубине упрочненного слоя. И если систематические исследования по определению остаточных напряжений и их влиянию на характеристики долговечности при нормальной температуре ведутся более полувека и здесь достигнуты определенные результаты в области много- и малоцикловой усталости, трибологии, структуре упрочненного материала, качества поверхностного слоя и его микротвердости, то процессы релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести исследованы в основном лишь для поверхностно упрочнённых градиентных призматических и цилиндрических деталей. Задачи же формирования и релаксации остаточных напряжений для упрочнённых плоских призматических деталей с концентраторами напряжений в форме надрезов и трещиноподобных дефектов в настоящее время требует своего решения.

Таким образом, вопросы прогнозирования кинетики остаточных напряжений в упрочненных призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях ползучести представляют собой важную задачу теории и практики производства деталей машин, например, в энергетическом и авиационном про-

мышленных комплексах, и актуальность научных исследований в данном направлении не вызывает сомнений.

3. Научная новизна основных результатов исследования. Экспериментальное определение остаточных напряжений в поверхностно упрочненных деталях является задачей трудоёмкой и материально затратной. И если для определения остаточных напряжений после технологических операций разработанные методы (как правило – разрушающего характера) хорошо отработаны и частично автоматизированы, то их определение в условиях высокотемпературной ползучести представляет большую проблему, поскольку необходимо применять разработанные методы в различные моменты времени, прерывая процесс ползучести и охлаждая деталь. В силу разрушающего характера методов определения остаточных напряжений необходимо иметь большое количество упрочненных образцов, испытываемых при одинаковых программах температурно-силового нагружения в условиях ползучести на различных временных базах. Поэтому естественным образом возникает потребность разработки аналитических методов расчета релаксации остаточных напряжений упрочненных элементов конструкций при ползучести с минимальным привлечением экспериментальных исследований в некоторых реперных точках временного интервала исследования (например, в конечной точке этого интервала) для проверки адекватности расчетных методов. Но такую схему можно реализовать лишь для гладких поверхностно упрочнённых деталей. Для деталей с концентраторами напряжений после опережающего поверхностно пластического деформирования такая схема не реализуема, потому что экспериментально определить поля остаточных напряжений в области концентратора напряжений практически невозможно, тем более – в условиях ползучести. Исходя из этого, можно сформулировать основное научное достижение автора настоящей диссертационной работы, полученное впервые и нашедшее отражение в его публикациях, – это разработка феноменологических методов реконструкции полей остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических образцах с концентраторами напряжений и методов расчета эволюции остаточных напряжений в процессе высокотемпературной ползучести в условиях сложного напряженного состояния от внешних нагрузок, т.е. постановки и решения в определенной мере новых краевых задач реологического деформирования.

При решении основной задачи диссертационного исследования Шишкун Д.М. получил ряд новых логически связанных научных результатов частного порядка, в том числе:

- разработан и реализован метод расчёта остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений типа сквозных надрезов полукруглого, квадратного, V-образного, полуэллиптического профилей после опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой и упругопластической постановках задачи;
- разработан метод исследования остаточных напряжений в призматической детали с периодически повторяющимися концентраторами напряжений типа сквозных полукруглых надрезов;
- результаты исследования влияния угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта в упрочнённом призматическом образце на формирование остаточных напряжений для упругопластической постановки задачи;
- разработан и реализован метод расчёта релаксации остаточных напряжений в призматических упрочнённых деталях с концентраторами напряжений при высокотемпературной ползучести в условиях термоэкспозиции и силового воздействия при трёхточечном изгибе;
- параметрический анализ напряженно-деформированного состояния в упрочненных призматических образцах с концентраторами напряжений в достаточно широком диапазоне изменения формы и геометрии надрезов и трещиноподобных дефектов;
- научно-обоснованный анализ соответствия полученных соискателем решений с экспериментальными данными в частных случаях;
- разработка нового алгоритмического и программного продукта для реализации методов решения краевых задач реконструкции остаточных напряжений и их релаксации в процессе ползучести для призматических конструктивных элементов с концентраторами напряжений;
- результаты новых теоретических исследований влияния вида температурно-силового нагружения на напряженно-деформированное состояние и релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести в упрочненных призматических деталях с концентраторами напряжений из сплава ЭП742 ($T = 20^\circ\text{C}$ и $T = 650^\circ\text{C}$), имеющего широкое применение, например, в авиадвигателестроении и энергетическом машиностроении.

Суммируя вышеизложенное, следует констатировать, что основные научные результаты и выводы диссертационной работы обладают научной новизной.

Таким образом, поставленная в диссертационном исследовании цель – разработка методов реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического деформирования призматических образцов с концентраторами напряжений в форме надрезов и трещиноподобных дефектов и методов расчёта релаксации остаточных напряжений в этих элементах конструкций в условиях ползучести при различных программах нагружения – выполнена Шишкиным Д.М. в полном объеме.

4. Достоверность результатов диссертации. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок математических и физических задач, использованием научно-обоснованных расчетных схем, применением апробированных численных методов расчета, реализацией алгоритмов и вычислительных процедур с использованием современных технологий программирования, корректным заданием исходных данных, объективным анализом полученных результатов.

Диссертантом использован достаточный объем экспериментальных данных для обоснования вводимых гипотез, проверки адекватности основных расчетных конечно-элементных моделей для оценки характера распределения остаточных напряжений после процедуры опережающего поверхностного пластического деформирования и в процессе ползучести.

Выполнено сопоставление результатов расчётов по разработанным численным методам с опубликованными данными расчётов на основе метода сеток из независимых источников и экспериментальными данными в частном случае гладких поверхностно упрочнённых призматических деталей.

5. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики.

Значимость результатов для науки:

- разработан новый численный метод реконструкции остаточных напряжений в призматических образцах с концентраторами напряжений в виде надрезов различной геометрической формы и размеров и трещиноподобных дефектов после опережающего поверхностного пластического деформирования для упругопластической постановки задачи;

- разработан метод расчёта релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце с концентраторами напряжений в условиях ползучести;
- установлены закономерности распределения остаточных напряжений в призматических образцах с концентраторами напряжений после процедуры упрочнения и в любые временные сечения в процессе их релаксации в условиях ползучести.

Значимость результатов для практики:

- разработанный метод реконструкции остаточных напряжений и их релаксации вследствие ползучести для призматических поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений в виде надрезов технологического или эксплуатационного характера и трещиноподобных дефектов может быть использован для оценки эффективности поверхностного пластического деформирования в условиях высоких температур и действия механических эксплуатационных нагрузок;
- выявленные закономерности распределения остаточных напряжений в плоских деталях с концентраторами напряжений из сплава ЭП742 ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $T = 650^{\circ}\text{C}$) могут быть использованы в задачах параметрической надежности упрочненных элементов конструкций (по величине остаточных напряжений) при оценке остаточного ресурса по схеме эксплуатации по техническому состоянию при нанесении дефекта после соударения упрочнённой детали с инородным телом;
- разработанные теоретические положения, методики, алгоритмы внедрены на предприятии ПАО «ОДК.Кузнецов» (г. Самара) и могут использоваться на других отечественных предприятиях авиадвигательстроения и энергетического машиностроения, а также в учебном процессе в высших учебных заведениях.

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы Шишкина Д.М. в достаточном объеме опубликованы в научных журналах (в том числе, в требуемом минимуме из перечня ВАК, при этом 4 статьи индексируются в международных базах данных WOS и Scopus) и трудах конференций различного статуса, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня и научных семинарах в ведущих университетах. Считаю, что рецензируемая диссертационная работа в достаточной мере опубликована и апробирована.

7. Диссертация и автореферат написаны понятным научным языком с правильным использованием научной и технической терминологии. Содержание диссертации подробно, ясно и в полном объеме раскрывает постановку, методы, алгоритмы, процедуры и результаты решения поставленных задач. Автореферат в целом отражает основное содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в целом соответствует существующим требованиям.

8. Замечания по содержанию и оформлению работы.

Существенных замечаний, влияющих на положительное отношение к диссертационной работе, в автореферате и диссертации не выявлено. Отметим некоторые замечания.

- 1) Принятие в качестве исходных данных диаграммы растяжения материала ЭП742 является достаточно некорректным, так как в работе все решения задач выполнены в условиях сжатия (рис.3.1).
- 2) В диссертации не приведены механические характеристики и нормативный документ на материал ЭП742, из которого были изготовлены изучаемые стержни.
- 3) Не проведена оценка влияния изгиба на эпюру остаточных напряжений σ_x (связано с упрочнением только одной грани прямоугольного стержня).
- 4) Не приведены результаты расчёта эпюр остаточных напряжений σ_x по ширине сечения ни в задачах с упругой, ни в задачах с упруго-пластической постановкой.
- 5) Принятие одинаковой эпюры остаточных напряжений для стержней с различной высотой сечения некорректно, так как это возможно только при условии назначения режима упрочнения под каждый сортамент сечения (стр. 50).
- 6) При решении задач по трещиноподобным дефектам не учитывалось условие, связанное с возможным контактом поверхностей (особенно при малом угле раскрытия).
- 7) Все результаты получены на основе численных методов с использованием конечно-элементного моделирования с применением вычислительного комплекса ANSYS. Однако изложению сути этих численных методов в диссертации отведено незначительное место, а в автореферате их описание практически отсутствует. Поскольку задачи, рассмотренные в диссертации, достаточно сложные, то описанию численных методов стоило уделить большее внимание как в диссертации, так и в автореферате.

8) В диссертации все модельные расчёты выполнены на примере одной технологии упрочнения – виброударной ультразвуковой обработки поверхности призматического образца из сплава ЭП742. Возникает вопрос об универсальности разработанных методов формирования остаточных напряжений в образцах с концентраторами напряжений после применения других технологий упрочнения (обкатка роликом, алмазное выглаживание и др.), приводящих к деформационной анизотропии в упрочнённом слое в плоскости упрочнения. В диссертации эти вопросы не обсуждаются.

9) При решении задач ползучести упрочнённых призматических образцов учитывалась зависимость модуля Юнга от температуры при температурно-силовом нагружении, а коэффициент Пуассона полагался постоянным. Но тогда логичнее было бы и для коэффициента Пуассона ввести температурные зависимости и исследовать влияние этой зависимости на релаксацию остаточных напряжений.

10) Желательно было бы привести список принятых обозначений. Тогда не было бы неточностей с обозначениями. Например, в разделе 2.2 в формулах (2.2)-(2.4) и в разделе 3.2. на с. 86 в формуле (3.1), а также в контексте, одним и тем же символом α обозначены параметры, имеющие различный физический смысл. Аналогично, одно и тоже обозначение q используется для пластической деформации и равномерно распределённой нагрузки.

Отмеченные недостатки носят частный характер и не влияют на общее положительное отношение к рецензируемой работе.

9. Заключение по диссертации. Оценивая диссертационную работу и автореферат в целом, считаю, что диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным соискателем на высоком научном уровне и самостоятельно. Соискателем решена значимая научно-техническая задача в области разработки расчетных методов формирования остаточных напряжений вследствие технологических операций упрочнения для призматических элементов конструкций с концентраторами напряжений и их релаксации в процессе высокотемпературной ползучести.

Достоверность полученных теоретических результатов, сформулированных выводов не вызывает сомнений. Работа базируется на достаточном объеме полученных теоретических результатов, которые в частных случаях коррелируют с экспериментальными данными.

Исходя из выше изложенного, считаю, что диссертационная работа Шишкина Дмитрия Михайловича «Методы расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования» является завершенным научным исследованием, выполненным на достаточно высоком научном и методическом уровне, соответствует специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела», имеет научное и прикладное значение, отвечает пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 01.10.2018 года). Рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук ВАК Минобрнауки, а ее автор – Шишкин Дмитрий Михайлович – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Доцент кафедры сопротивления материалов,
кандидат технических наук по специальности
01.02.06 – Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры, доцент


Сазанов Вячеслав Петрович

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет)
443086, Россия, Самара, Московское шоссе, 34.

Кафедра сопротивления материалов
тел.: (8-846)2674526
e-mail: sopromat@ssau.ru



Сазанова В.П. удостоверяю.

Уполномоченный руководитель
отдела сопровождения деятельности
диссертационных советов Самарского университета

Васильева И.П.
13.1.2014 г. дата