

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Шишкина Дмитрия Михайловича

«Методы остаточных напряжений в поверхностно упрочненных
призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях
реологического деформирования»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы диссертации. Конструкции современных энергомашин, особенно в высокотехнологичных отраслях машиностроения и авиа двигателестроения, характеризуются высокой динамической напряженностью при одновременном повышении требований к их надежности и ресурсу. Работоспособность многих энергомашин определяется ресурсом деталей, имеющих концентраторы напряжений. Поэтому одной из главных задач обеспечения требуемой конструкционной прочности и долговечности таких деталей по прежнему остается проблема уменьшения негативного влияния повышения местных напряжений в зонах концентрации напряжений на их динамическую прочность. Наиболее эффективными являются технологические способы улучшения состояния поверхностного слоя. К ним, прежде всего, относятся методы поверхностного пластического деформирования (ППД), создающие наклеп поверхностного слоя и формирующие в нем остаточные напряжения сжатия. Оценка степени влияния остаточных напряжений на характеристики динамической прочности упрочняемых деталей с концентраторами напряжений осуществляется только экспериментально, путем натурных прочностных испытаний, что требует больших материальных и временных затрат и не всегда возможно. Наиболее остро эта проблема стоит в области высокотемпературной ползучести, когда на фоне ползучести происходит релаксация остаточных напряжений, наиболее интенсивно в локальной

области концентратора напряжений. Систематические теоретические исследования в области прогнозирования процесса релаксации остаточных напряжений в концентраторах напряжений с учетом большого разнообразия конструкционных форм элементов конструкций, применяемых материалов, характера нагрузки, условий эксплуатации и различных технологий упрочнения в настоящее время практически отсутствуют, хотя необходимость в таком прогнозировании для ускоренного проектирования и доводки современных высоконагруженных машин при высоких температурах очевидна. Представленная диссертационная работа частично направлена на решение отмеченной важной проблемы применительно к поверхностно упрочненным призматическим образцам с концентраторами напряжений типа надрезов различной формы и геометрических параметров и трещиноподобными дефектами. Автор на основе системного подхода разработал обоснованные расчетные методы формирования остаточных напряжений в призматических деталях с «мелкими» надрезами и трещиноподобными дефектами после опережающего поверхностного пластического деформирования гладкой детали и методики расчета релаксации наведенных остаточных напряжений в процессе высокотемпературной ползучести в условиях термоэкспозиции и частного вида силового нагружения – трехточечного изгиба. Рассматриваемая диссертационная работа Д.М. Шишкина решает как важную задачу теоретического характера в области ползучести упрочненных элементов конструкций, так и не менее важную задачу современного энергетического машиностроения и, несомненно, является актуальной.

Новизна исследований и полученных результатов. Современное развитие научных исследований по проблеме формирования остаточных напряжений в гладких деталях и с концентраторами напряжений после упрочнения и их релаксации в условиях высокотемпературной ползучести идет в основном по двум направлениям. Во-первых, развиваются экспериментальные методы определения остаточных напряжений в гладких

упрочненных пластинах, трубах, валах, в том числе, и в деталях с концентриаторами напряжений (галтели, отверстия и т.д.). Однако большинство из них применимо лишь в условиях нормальных (неповышенных) температур, их использование при высокотемпературной ползучести невозможно. Во-вторых, в последнее десятилетие в связи с возросшими возможностями созданного современного программного обеспечения в многочисленных коммерческих пакетах развивается направление, связанное с непосредственным моделированием технологического упрочнения поверхности (как правило, дробеструйной обработки поверхности). Однако учет всех технологических факторов является сложной задачей в силу случайности многих факторов. Поэтому эти решения при нормальных температурах дают более качественную, нежели количественную, картину формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в приповерхностном слое и использование полученного НДС в задачах последующей ползучести приводит к неадекватным результатам даже для гладких (бездефектных) деталей.

В связи с вышеизложенным основным научным результатом рецензируемой работы является разработка феноменологического (расчетно-экспериментального) метода формирования остаточных напряжений в призматических образцах с концентраторами напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования, когда «мелкие» концентраторы наносятся на упрочненный гладкий образец, и методов расчета релаксации предварительно напряженного состояния в локальных зонах концентрации напряжений вследствие ползучести. Постановки задач и методы их решения являются новыми для механики деформируемого твердого тела. Из наиболее значимых научных достижений частного характера соискателя, полученных впервые и нашедших отражение в его публикациях, можно отметить следующие: исследование в рамках предложенного метода влияния формы и геометрических размеров сквозных поперечных надрезов полукруглого, квадратного, V-образного,

полуэллиптического профилей после опережающего поверхностного пластического деформирования на формирование остаточных напряжений в упругой и упругопластической постановках; решение задачи об оптимальной зоне упрочнения части гладкой поверхности под концентратор напряжения; результаты решения задачи для распределения остаточных напряжений в периодической системе концентраторов напряжений; метод решения задачи о влиянии угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта на формирование остаточных напряжений в упругопластической постановке; метод решения задачи формирования остаточных напряжений в упрочненном образце с несквозной трещиной; разработка метода релаксации остаточных напряжений в призматических упрочненных деталях с концентраторами напряжений в условиях ползучести при термосиловом нагружении.

Отметим, что все сформулированные в диссертации элементы новизны и положений, выносимых на защиту, правомерны, и все полученные результаты соответствуют основным областям исследования специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается непротиворечивостью модельных представлений реальному состоянию материала в локальной области концентраторов напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования и в процессе ползучести; корректным использованием известных положений теорий упругости, пластичности, ползучести и метода конечных элементов; непротиворечивостью и соответствием результатов расчетов по разработанным методикам соискателя с экспериментальными данными в частных случаях и с результатами численных исследований из независимых источников других авторов.

Значимость результатов для науки и практики. Результаты, представленные в диссертационной работе Шишкина Д.М., имеют большое значение в теоретическом плане для внутреннего логического развития

механики деформируемого твердого тела в области исследования методов решения краевых задач для элементов конструкций со сложными реологическими и физико-механическими свойствами материалов, поскольку сформулированы и решены новые задачи для поверхностно упрочненных призматических деталей с концентраторами напряжений в виде надрезов и трещин после упрочнения и в условиях ползучести. С прикладной точки зрения полученные соискателем результаты имеют важное значение для науки о конструкционной прочности упрочненных высоконагруженных деталей машин и прежде всего авиационных газотурбинных двигателей, поскольку содержат в себе новые подходы к прогнозированию полей остаточных напряжений упрочненных деталей с концентраторами в условиях ползучести, по распределению которых можно судить, например, о характеристиках усталостной прочности. В частности, информация о кинетике остаточных напряжений при ползучести является базовой для оценки остаточного ресурса при эксплуатации по техническому состоянию. Практическая значимость полученных результатов состоит также в том, что они представляют возможность создателям, например, авиадвигателей и других сложных машин оценить уже на стадии проектирования реальную динамическую прочность упрочненных деталей с концентраторами напряжений и тем самым оптимизировать конструкционно, а также ускорить доводку новых образцов машин и сократить затраты на ее проведение.

Публикация основных материалов, апробирование работы, оформление. Основные материалы работы и ее результаты достаточно полно отражены в приведенных публикациях автора. Диссертация прошла апробацию на многих научно-технических конференциях, на которых были представлены доклады автора, а также на научных семинарах в ведущих научных школах по данной тематике. Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации. Диссертационная работа написана хорошим языком, достаточно проиллюстрирована. При использовании в

тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки.

Замечания по диссертационной работе.

1. В диссертации (глава 2) приведены результаты реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций после упрочнения с учетом деформационной анизотропии в приповерхностном слое, учитываемой параметром α . Однако в дальнейших расчетах не проиллюстрировано влияние этого параметра на формирование остаточных напряжений в локальной области концентратора напряжений и их релаксацию в процессе ползучести.

2. При решении краевых задач для бездефектных поверхностно упрочненных образцов использовалось условие самоуравновешенности для остаточных напряжений, но не использовалось условие равенства нулю моментов, возникающих от собственных напряжений. Если учитывать и моменты, то аппроксимация для $\sigma_x = \sigma_x(y)$, которая задается в диссертации соотношением (2.6) (в автореферате – формула (2)), качественно не отражает поведение этой компоненты за пределами упрочненного слоя (в «теле» образца).

3. При решении задачи фиктивной термоупругости (и далее термоупругопластичности) указано, что фиктивное температурное поле можно задавать произвольно. Однако соискатель использует температурное поле, соответствующее первой краевой задаче теплопроводности с большой разностью температур на противоположных гранях. Возникает вопрос: зачем дополнительно решать задачу теплопроводности, если можно использовать, например, линейное распределение температуры с небольшое разницей между температурами на упрочненной грани и ей противоположной? Тем самым отпадает необходимость в аппроксимации модуля Юнга от температуры.

4. При решении задач ползучести предполагается, что образец прогревается до температуры «эксплуатации» образца мгновенно. Однако

такая постановка «нефизична», требуется определенное время для создания стационарного постоянного поля температур. Учитывая высокий уровень остаточных напряжений, за этот период может произойти существенная релаксация остаточных напряжений, что в модели не учитывается.

5. Как и в любой диссертации имеются в незначительном количестве опечатки и неточности. Так, в разделе 3.2 на с. 86–87 в формулах (3.2), (3.3) и в разделе 4.2 на с. 123 и с. 125 в формулах (4.6) и (4.9), а также в контексте, одной и той же величиной c обозначены параметры, имеющие различный физический смысл. Аналогичное замечание относится к величине q , которой обозначена пластическая деформация и равномерно распределенная нагрузка.

Сделанные замечания носят частный характер, не умаляющий достоинств работы, и не влияют на общую положительную оценку выполненной работы.

Оценка диссертации в целом. Заключение. Указанные выше недостатки не уменьшают научную и практическую значимость основных результатов диссертации. В целом работа выполнена на высоком научном уровне. Анализ результатов исследований, изложенных в диссертации, подтверждает обоснованность сформулированных автором научных положений, выводов и рекомендаций. Основные результаты работы в полном объеме освещены в публикациях соискателя. На основании вышеизложенного рассматриваемая диссертационная работа Шишкина Дмитрия Михайловича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи – разработки новых методов расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования, которые востребованы практикой в механике упрочненных конструкций. Работа является законченным научным исследованием, выполнена соискателем самостоятельно, отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»,

утверженного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 28.08.2017 года), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – механика деформированного твердого тела.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор,
лауреат Государственной премии РСФСР,
заведующий лабораторией ползучести
и длительной прочности Института
механики федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный
университет им. В. Ломоносова»

Локощенко Александр Михайлович

24. XI. 2021

Служебный адрес:

119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1
Тел.: 8(495)939-53-08, 8(903)584-82-78
e-mail: loko@imec.msu.ru

Подпись А.М. Локощенко и сведения
о нем удостоверяю:

И.о. директора Института Механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Георгиевский Д.В.

