

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Замбалова Сергея Доржиевича на тему «Математические модели и численные методы решения связанных задач МДТТ для прогнозирования деформации и усталостной долговечности элементов конструкций в сложных режимах нагружения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Замбалова Сергея Доржиевича «Математические модели и численные методы решения связанных задач МДТТ для прогнозирования деформации и усталостной долговечности элементов конструкций в сложных режимах нагружения» посвящена развитию численного подхода к описанию процессов деформирования и усталостного разрушения элементов конструкций при силовом воздействии потоков текучей среды в неизотермических условиях. Анализ процессов формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций при сложном аэрогидродинамическом нагружении является актуальной задачей и непосредственно связан с возникновением нового подхода к развитию современных методов проектирования ответственных конструкций. Традиционные методы, ограниченные рамками только одной научной дисциплины, и учет только наиболее важных функциональных особенностей уступают место системному междисциплинарному анализу. В рамках данного подхода изучение прочностных и усталостных характеристик элементов конструкций сложной конфигурации при силовом аэрогидродинамическом нагружении является актуальным направлением исследований механики деформируемого твердого тела (МДТТ).

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации в достаточной степени обоснованы и опираются на фундаментальные математические формулировки и принципы, принятые в современной механике деформируемого твердого тела и механике разрушения.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректной постановкой физико-математической модели нелинейных

связанных задач МДТТ и достаточным уровнем сходимости численных результатов. Полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными результатами других авторов.

Научная новизна диссертации заключается в применении новых численных данных о процессе деформирования и усталостного разрушения элементов конструкций при сложном режиме нагружения для решения научно-прикладных задач, связанных с активным взаимодействием деформируемого твердого тела и неизотермических потоков текучей среды.

Новые научные результаты и выводы диссертационной работы, заключаются:

- в создании вычислительной модели процессов формирования сложного НДС и прогнозирования характеристик усталостной долговечности элементов конструкций при сложном циклическом режиме нагружения;
- в создании методики численного моделирования процессов деформирования, накопления повреждений и усталостного разрушения твердых тел в механических системах с активным взаимодействием неизотермических потоков активной среды;
- в создании алгоритма численного решения связанных нестационарных задач МДТТ с использованием математических методов конечных элементов и конечных объемов в рамках единой вычислительной модели;
- в установлении закономерностей развития деформаций и усталостного разрушения тонкостенных элементов конструкций в условиях циклически изменяющихся нагрузок с учетом нелинейных эффектов в механических системах;
- в получении новых данных о кинетике повреждаемости и оценке остаточного ресурса типовых элементов конструкций тепловых двигателей в условиях сложного нагружения.

Разработанные модели и методики расширяют возможности применения методов численного моделирования процессов деформирования, накопления повреждения и разрушения в рамках решения связанных задач МДТТ.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности применения разработанной вычислительной модели для описания механического поведения твердых тел в условиях циклически изменяющегося сложного нагружения. Полученные данные о процессах формирования сложного НДС, упругопластического деформирования и усталостного разрушения могут быть использованы в процессе проектирования и создания новых устройств строительной, авиационной и энергетической промышленности, подверженных интенсивному аэрогидродинамическому нагружению.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения, а также содержит список литературы из 126 работ.

Во введении обоснованы цели и задачи исследования, актуальность темы. Приведены положения, выносимые на защиту, обозначены достоверность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первый раздел посвящен обзору методов и алгоритмов численного решения связанных задач МДГТ при сложном режиме нагружения. Описаны методики численного моделирования процессов усталостного разрушения элементов конструкций в условия циклически изменяющегося сложного нагружения.

Во втором разделе изложена постановка связанной задачи МДГТ. Описана модель оценки характеристик усталостной долговечности в механических системах, где твердые тела испытывают значительные деформации, связанные с изменением структуры течения потоков жидкости или газа. Приведена полная математическая постановка связанной задачи для твердого тела и жидкости (газа). Отдельно рассматриваются модели поврежденности с целью описания усталостной долговечности. Предложенная обобщенная постановка позволяет получить оценку усталостной долговечности и оценить кинетику повреждаемости элементов

конструкций с учетом вида сложного нагружения в рамках единого вычислительного подхода.

В третьем разделе представлена методика моделирования НДС элементов конструкций и оценки характеристик усталостной долговечности механических систем в сложных режимах нагружения. Приводится полная схема расчета связанной задачи и оценки усталостной долговечности. Твердотельная задача базируется на классических подходах МДТТ, в качестве конститутивной модели (определяющих соотношений) выбирается упругопластическая модель с изотропным и кинематическим упрочнением. Задача МЖГ формулируется на основе законов сохранения массы, импульса и энергии, а в качестве определяющих соотношений используется RNG  $k - \xi$  модель. Модель оценки характеристик усталостной долговечности при циклическом нагружении твердого тела, возникающем при воздействии неизотермических потоков жидкости или газа, базируется на основе кинетического модели накопления повреждений.

В четвертом разделе проведена верификация разработанных моделей и методик на ряде тестовых задач. Полученные результаты сравнивались с известными аналитическими и экспериментальными данными. Первой и второй задачами являлось моделирование взаимодействия упругой балки с потоком жидкости и оценка усталостного ресурса балки, соответственно. Задачи были решены в стационарном и нестационарном случаях. Решение связанной задачи позволило оценить характерные зависимости параметров воздействия газодинамических потоков на балку и определить усталостную долговечность балки при циклических нагружениях под действием турбулентных потоков. Третья верификационная задача была посвящена численному моделированию циклического деформирования плоского образца с отверстием. Четвертая верификационной задачей являлось численное моделирование циклического нагружения пластины с вырезом. Полученные диаграммы деформирования и оценка меры поврежденности по

кинетической модели хорошо согласуется с известными экспериментальными результатами и данными других авторов. Во всех верификационных задачах проверена сходимость и устойчивость разработанного численного подхода.

Пятый раздел посвящен численному моделированию процессов деформирования, накопления повреждений и усталостного разрушения элементов конструкции при сложном режиме нагружения. Приведены результаты численных исследований процессов деформации и усталостного разрушения типовых элементов конструкции устройства для распыления жидкости. Получены новые данные о закономерностях развития деформации и их влияния на усталостную долговечность тонкостенных элементов конструкций при циклическом сложном нагружении. Представлены результаты численного моделирования связанных процессов течения рабочих сред и деформации типовых элементов конструкций тепловых двигателей. На основе численного решения связанных задач МДТТ получены новые данные о кинетике повреждаемости и остаточном ресурсе элементов конструкции.

В заключении диссертации сформулированы результаты работы и основные выводы по проведенному исследованию. Содержание автореферата правильно отражает содержание диссертационного исследования. Оформление диссертации полностью соответствует требованиям, предъявляемым к квалификационным работам на соискание ученой степени.

Результаты диссертация были обсуждены на всероссийских и международных научных конференциях. Основные научные результаты диссертации изложены в 8 печатных работах, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

По диссертации С.Д. Замбалова необходимо сделать ряд замечаний:

1. В работе не приводится обоснование выбора полуэмпирических силовых и деформационных моделей накопления повреждений для оценки усталостного ресурса материалов при мало- и многоцикловом нагружении. Тут же следует отметить, что в настоящее время актуальным является вопрос исследования роли накопления повреждений при сверхмногоцикловых нагружениях (гигацикловая усталость), когда механизмы накопления микрповреждений проявляются в упругой области реакции материала при существенно малых значениях амплитуд напряжений.

2. При постановке физико-математической модели, описывающей формирование НДС твердых тел используется модель комбинированного изотропного и трансляционного упрочнения. Вероятно, следовало бы более конкретно указать границы применимости предлагаемой модели для различных материалов, а также установить допустимый диапазон условий нагружения.

3. В математической постановке для твердого тела присутствует учет температуры (уравнение (9), граничные условия на стр. 34), но к сожалению не приводится уравнение теплопроводности или тепловыделения с учетом пластической деформации. Каким образом решалась температурная задача для твердого тела?

4. Реальные жидкие и газообразные среды представляют собой многокомпонентные среды, при этом в рассматриваемых задачах в последнем разделе, в которых в том числе необходим учет химических реакций и горения, свойства газообразной среды выбираются эффективными, а их оценки в работе не достаточно детализированы.

5. На рисунках 4 и 5 диссертации и рисунке 2 автореферата в обозначении границы между твердым телом и жидкостью/газом используется  $\sigma\Omega$ , тогда как далее по тексту граница обозначается как  $\partial\Omega$ .

6. На стр. 48 приведена формула для числа Рейнольдса с учетом динамической вязкости  $\eta$ , которая выше не определена. Как при этом

учитывалось разделение вязкости на молекулярную и турбулентную? Также на стр. 99 символом  $\mu$  определен коэффициент трения, которым выше обозначена вязкость (уравнение 12).

7. На стр. 102  $P_0$  и  $T_0$  названы стандартными условиями, под ними понимаются нормальные условия?

Сделанные замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа Замбалова Сергея Доржиевича является законченным научным исследованием, в котором содержится решение задачи численного моделирования процессов деформирования и усталостного разрушения элементов конструкций в системах с активным взаимодействием между деформируемым твердым телом и динамическим потоком текучей среды, направлена на разработку и развитие математических моделей и численных методов анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического решения, что соответствует пунктам 7 и 8 паспорта специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Результаты диссертационной работы С.Д. Замбалова имеют существенное значения для развития специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Считаю, что диссертационная работа «Математические модели и численные методы решения связанных задач МДТТ для прогнозирования деформации и усталостной долговечности элементов конструкций в сложных режимах нагружения» соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. N 842, к кандидатским диссертациям (п. 9), а ее автор, Замбалов Сергей Доржиевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент  
кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник лаборатории  
физических основ прочности  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт механики сплошных сред  
Уральского отделения  
Российской академии наук,  
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1,  
E-mail: buv@icmm.ru  
www.icmm.ru  
«01» декабря 2015 г.

Баяндин Юрий Витальевич

Я, Баяндин Юрий Витальевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Замбалова Сергея Доржиевича, и их дальнейшей обработкой.

Подпись кандидата физико-математических наук,  
научного сотрудника Ю.В. Баяндина подтверждаю

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН



Н.А. Юрлова