

Отзыв

официального оппонента

на диссертацию Замбалова Сергея Доржиевича

«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»

Актуальность. Диссертационная работа С.Д.Замбалова посвящена численному анализу прочностных и усталостных характеристик элементов конструкций в условиях циклического сложного нагружения. Современный подход к проектированию и разработке новых объектов техники характеризуется активным внедрением методов системного междисциплинарного анализа. В рамках данного подхода существенное значение приобретают вопросы учета взаимосвязей между полем деформации твердого тела и распределением динамических параметров текучей среды (флюида, газа). Особый интерес представляет исследование надежности элементов конструкций, подверженных воздействию неизотермических потоков жидкости или газа.

В этой связи тематика диссертации С.Д.Замбалова, связанная с изучением механического поведения и расчета усталостной долговечности элементов конструкций в условиях сложного аэрогидродинамического нагружения, является весьма актуальной.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования подтверждается использованием апробированных математических моделей и методов анализа процессов деформирования и усталостного разрушения, а также применением современных инструментов численного анализа сложного напряженно-деформированного состояния (НДС). Результаты численных исследований прочностных и усталостных характеристик твердых тел базируются на фундаментальных научных работах отечественных и зарубежных исследователей, посвященных описанию механического поведения твердых тел при сложных режимах нагружения.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректной математической постановкой задач механики деформируемого твердого тела, оригинальностью предложенных методов и алгоритмов численных расчетов и подтверждается сопоставлением результатов моделирования с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов.

В диссертационной работе С.Д.Замбалова сформулированы следующие **новые научные результаты и выводы:**

1. развит междисциплинарный подход к моделированию процессов сложного деформирования и усталостного разрушения элементов конструкций под действием аэрогидродинамических потоков текучей среды;
2. предложена физико-математическая модель механического поведения твердых тел в условиях сложного нагружения с учетом циклических нагрузок;
3. установлены закономерности эволюции повреждений и усталостного разрушения тонкостенных элементов конструкции при сложном нагружении. Выявлена кинетика повреждаемости и даны оценки остаточного ресурса ряда элементов конструкций.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованной литературы, содержащего 126 наименований.

В первом разделе приведен краткий обзор исследований российских и зарубежных авторов по анализу процессов взаимодействия между деформируемым твердым телом и потоками жидкости или газа. Показано, что деформирование механической системы при динамическом сложном нагружении приводит к возникновению циклических колебаний и усталостному разрушению элементов конструкции. Проведен анализ исследований усталостной долговечности, рассмотрены основные модели накопления повреждений при циклических нагружениях. Установлено, что данные о реализующемся НДС элементов конструкций являются ключевыми для анализа их усталостной долговечности. В целом, автором продемонстрировано хорошее знание литературных источников и владение современными достижениями в данной области науки.

Во втором разделе представлена обобщенная постановка нелинейной связанной задачи МДТТ. Для учета цикличности нагружения и развития пластических деформаций в твердом теле предложена модель комбинированного изотропного и трансляционного упрочнения, разработанная в трудах Новожилова, Кадашевича, Арутюняна, Вакуленко. Модель явно учитывает добавочные микронапряжения и параметр накопления пластической деформации (параметр Одквиста).

При описании движения текучей среды используется гидродинамическая модель К-эпсилон турбулентности с добавочным членом в уравнении для диссипации, который улучшает точность вычислений с высокими скоростями деформаций и учитывает влияние завихренности потока на турбулентность.

Одним из существенных моментов постановки является формулировка условия сопряжения между механическим поведением твердого тела и распределением динамических параметров течения потоков жидкости или газа, которое рассматривается в виде сопряжения давлений, скоростей и перемещений вдоль межфазовых границ среды. Решение задачи МДТТ на одном временном шаге используется в качестве краевых условий для следующего временного шага при решении задачи гидродинамики и наоборот.

Наряду с постановкой связанной задачи МДТТ автором сформулирована модель усталостной долговечности в условиях циклического сложного нагружения. Она основана на использовании комбинированной (силовой и деформационной) модели накопления повреждений.

Указанные модели предполагается использовать для решения задач деформирования элементов конструкций под воздействием нестационарных потоков текущей среды, и после их решения выполнить анализ усталостной долговечности конструктивных элементов деформируемого твердого тела.

В третьем разделе описана методика численного моделирования процессов деформирования и усталостного разрушения элементов конструкций, взаимодействующих с нестационарными неизотермическими потоками жидкости или газа. Численное решение задач предполагается строить с использованием различных методов и различных вычислительных инструментов: метод конечных элементов и вычислительный пакет ANSYS Mechanics – для решения задач деформирования твердых тел, и метод конечных объемов и вычислительный пакет ANSYS Fluid – для решения задач гидродинамики. Для взаимодействия между указанными пакетами в процессе вычислений автором разработан дополнительный программный модуль, обеспечивающий обмен данными между ними. Следует отметить, что указанные пакеты численного моделирования открывают широкие возможности для исследователей из разных областей науки и позволяют получать решения комплексных междисциплинарных задач. При этом необходимо иметь в виду, что эти пакеты основаны на использовании фундаментальных законов механики, и каждый входной параметр является весьма важным для получения достоверного решения. Таким образом, для анализа корректности получаемых решений необходимо провести дополнительные верификационные расчеты и сравнить результаты с достоверными теоретическими и экспериментальными данными, чему и посвящен следующий раздел диссертации.

Четвертый раздел посвящен решению набора верификационных задач. Основной целью является апробация разработанных моделей, методик и алгоритмов. Решение верификационных задач строится на основе различных сеточных разбиений, а также с использованием различных временных шагов интегрирования. Численные решения сравниваются с данными, полученными из аналитических решений и экспериментальных исследований других авторов для рассматриваемых верификационных задач. Автором решен представительный набор верификационных задач как по анализу связанных задач МДТТ, так и по анализу усталостной долговечности. Показана хорошая корреляция полученных решений с данными других авторов.

В пятом разделе представлены результаты численного моделирования процессов формирования сложного НДС и усталостного разрушения элементов конструкций в условиях циклического аэрогидродинамического нагружения на примере решения двух связанных задач МДТТ.

Проведено исследование механического поведения и усталостной долговечности тонкостенных элементов камеры распределения центробежной форсуночной установки, используемой для утилизации высоковязких видов топлива. Показано, что использование единой вычислительной модели в рамках решения связанной задачи МДТТ приводит к увеличению точности прогнозирования усталостной долговечности на величину до 35% за счет более точного определения реализуемых напряжений.

Рассмотрена задача о влиянии тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания роторно-поршневого двигателя на прочностные и усталостные характеристики пластинчатых элементов системы уплотнения. Проведено численное моделирование кинетики накопления повреждений в пластинах. Установлены закономерности процесса накопления повреждений, получены численные данные об остаточном ресурсе элементов конструкций в условиях сложного циклического нагружения.

Результаты диссертационной работы С.Д.Замбалова опубликованы в 8 печатных работах, включая 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.

Достоинства и недостатки содержания и оформления диссертации. По диссертационной работе С.Д.Замбалова имеются следующие замечания и неточности:

1. В работе используются сеточные методы конечных элементов и конечных объемов. Следовало бы провести обоснование выбора оптимального пространственного разбиения расчетной области, а также более подробно исследовать сеточную сходимость численных расчетов.
2. В рассмотренных задачах краевое условие взаимодействия границы твердого тела и текучей среды ставится в виде условия полного прилипания. Следовало бы дать обоснование использованию этого условия, а также указать границы применимости рассматриваемых моделей.
3. В алгоритме расчета усталостной долговечности после получения решения вычисляется параметр вида напряженного состояния (параметр Лоде-Надаи). Однако не сказано для чего это делается, и какое влияние на дальнейшие расчеты этот параметр оказывает. Тем не менее, в конкретном расчете усталостной долговечности элементов конструкции устройства для распыления жидкости на основе этого параметра используются конкретные экспериментальные данные, полученные именно для рассчитанного вида напряженного состояния. Следовало бы дать объяснение необходимости расчета данного параметра при описании общего алгоритма.
4. На стр. 63 приведено выражение для момента инерции рассматриваемого элемента конструкции и дается его числовое значение. При этом не приводится размерность этой величины.
5. В ряде задач на отдельных участках границы ставятся краевые условия симметрии (стр. 68, 75), однако в описании приводится только условие

равенства нулю нормальной составляющей вектора смещений. Необходимо привести также и условие отсутствия касательных напряжений.

6. В ряде верификационных задач рассматривается плоская (двумерная) постановка. При этом не сказано, какое приближение выбирается вдоль третьей оси координат: плоская деформация или плоское напряженное состояние.

Указанные выше замечания и неточности не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертация С.Д.Замбалова отражает объем проделанных комплексных исследований, включающих в себя анализ и обобщение существующих исследований процесса взаимодействия деформируемого твердого тела и потоков текучей среды, а также характеристик усталостной долговечности элементов конструкций при сложном нагружении, построение вычислительной модели для описания процессов деформирования и усталостного разрушения, проведение численных расчетов, выполненных на высоком научно-техническом уровне с применением современных численных методов, анализ полученных результатов.

Диссертация представляет собой законченную научную квалификационную работу, в которой предложен способ решения связанных задач МДГТ по прогнозированию прочностных и усталостных характеристик элементов конструкций при различных режимах нагружения, включая сложные режимы. Полученные в диссертации результаты являются новыми. Работа имеет практическую значимость. Диссертация оформлена в соответствии с предъявляемыми требованиями, автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационного исследования С.Д.Замбалова позволяют заключить, что в работе решена задача, имеющая важное значение для развития механики деформируемого твердого тела в части законов деформирования, накопления повреждений и разрушения материалов, разработки критериев прочности при сложных режимах нагружения, постановки и решения связанных краевых задач для тел сложной конфигурации при нестационарных механических и тепловых воздействиях со стороны аэрогидродинамических потоков на элементы конструкции, в том числе применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования. Тематика диссертации соответствует пунктам 1, 2, 6, 7 и 8 паспорта специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Полученные в диссертационной работе С.Д.Замбалова результаты позволяют существенно расширить возможности комплексного моделирования процессов деформирования, накопления повреждений и усталостного разрушения при динамическом воздействии активной среды на конструкционные элементы. Разработанные модели, методики и алгоритмы численной реализации могут быть использованы для решения прикладных задач, связанных с активным взаимодействием твердых тел и потоков жидкости или газа. Полученные данные о процессе формирования сложного НДС, кинетике повреждаемости и оценки усталостной долговечности могут

использоваться при инженерном анализе новых объектов техники и оборудования, подверженных циклическому сложному нагружению.

Разработанная модель описания механического поведения твердых тел в условиях сложного нагружения со стороны нестационарных потоков жидкости или газа может быть рекомендована для расчета НДС и усталостной долговечности элементов конструкций, подверженных циклическому нагружению (лопатки компрессоров, турбин, конструктивные элементы крыла летательных аппаратов, уплотнительные элементы двигателей (пластины, кольца), соединительные элементы нефтепроводов, газопроводов, пролетные строения и опоры мостов, инженерных сооружений и т.д.)

Заключение. Диссертационная работа Замбалова Сергея Доржиевича соответствует требованиям Положения о порядке присуждения научных степеней (п. 9), утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник

лаборатории механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН,

доктор физико-математических наук

(01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела),

старший научный сотрудник

Лавриков Сергей Владимирович

30 ноября 2015 года

630091, г. Новосибирск, Красный пр., д. 54

Тел. +7 (383) 217-05-36, e-mail: admin@misd.nsc.ru, <http://www.misd.ru/>

Подпись Лаврикова Сергея Владимировича заверяю,

Ученый секретарь ИГД СО РАН,

К.Т.Н.



А.П.Хмелинин