

ОТЗЫВ

официального оппонента Локощенко Александра Михайловича на диссертационную работу **Банщиковой Инны Анатольевны** «Ползучесть изотропных и ортотропных сплавов и длительная прочность элементов конструкций», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела.

Диссертационная работа И.А. Банщиковой посвящена *актуальной тематике* моделирования процессов формообразования металлических элементов конструкций в медленных режимах ползучести и построения моделей, учитывающих разные свойства сплавов на растяжение и сжатие, ортотропию материала и накопление повреждений при деформировании. Предложены режимы для максимального сбережения эксплуатационного ресурса изделий на стадии изготовления деталей и рекомендации по оценке длительной прочности элементов конструкций.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа изложена на 338 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 286 наименований, пяти приложений, содержит 89 рисунков, 24 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основная цель и конкретные задачи исследований, положения, выносимые на защиту, отмечены новизна и практическая значимость результатов, приведено краткое содержание работы по главам, сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

В первой главе описаны преимущества методов обработки конструкционных металлов давлением в медленных режимах ползучести и сверхпластичности, приведен обзор оборудования и изобретений. Для моделирования медленных температурно-скоростных режимов деформирования численно и экспериментально на примере ряда упрочняющихся и разупрочняющихся конструкционных сплавов (ВТ20, АМГ-6М, АК4-1, ЗВ, титан 17, Х18Н10Т) обосновано применение кинетических уравнений ползучести со скалярным параметром поврежденности, который отождествлен с нормированной деформацией, при этом на диаграммах ползучести «деформация–время» при постоянном напряжении деформация при разрушении может быть не постоянна.

Показано, что при растяжении и кручении стержней уровень накопления повреждений зависит от скорости деформирования, что приводит к необходимости решения задач по поиску температурно-скоростных режимов формообразования заготовок. На основе анализа экспериментальных данных на растяжение и сжатие образцов из алюминиевых и титановых сплавов выявлена необходимость разработки моделей для учета свойств анизотропии и разносопротивляемости материала при растяжении и сжатии в условиях ползучести при решении задач формообразования. На примере решения задачи о кручении круглого сплошного стержня с постоянной скоростью угла закручивания показана необходимость оценки длительности до разрушения с учетом распространения фронта разрушения.

Во второй главе рассмотрены изотропные сплавы с разными свойствами на растяжение и сжатие при ползучести. В начале главы приведен краткий обзор по моделям. Модель И.Ю. Цвелодуба, основанная на «трансформированном» пространстве напряжений, обобщена на случай упрочняющегося материала, при этом для описания экспериментальных данных одноосного деформирования используются степенные функции, все показатели которых для стадий установившейся, упрочнения и разупрочнения при растяжении и сжатии различны. Выполнена экспериментальная проверка модели при решении задач кручения круглых титановых стержней в условиях установившейся ползучести и кручения квадратных алюминиевых пластин из упрочняющегося и разупрочняющегося материалов.

В третьей главе в предположении установившейся ползучести с использованием скалярного потенциала построена модель ортотропного материала, учитывающая разные свойства при растяжении и сжатии. Интенсивность процессов в условиях одноосного деформирования описывается функциями с разными степенными показателями для растяжения и сжатии. С использованием предложенной модели:

- изучено влияние трансверсально-изотропных свойств материала на величину прогиба гладких и оребренных пластин и на величину угла закручивания сплошных и кольцевых стержней;
- получены новые аналитические решения и оценки для угловой скорости закручивания на основе принципов минимума полной мощности и дополнительного рассеяния для скручиваемых стержней круглого сплошного и кольцевого сечений, вырезанных в продольном направлении плиты и в направлении нормали к плите из трансверсально-изотропного сплава с

одинаковыми и разными свойствами на растяжение и сжатие. Показано возникновение депланации сечения при кручении стержня с круглым поперечным сечением из ортотропного материала;

– разработан программный комплекс «CreePL» на основе метода конечных элементов, предназначенный для решения в кинематической постановке прямых и обратных задач формообразования гладких панелей одинарной и двойной кривизны при медленных режимах деформирования в условиях чистого изгиба пластин из изотропного сплава с учетом разных свойств на растяжение и сжатие.

Получено, что результаты вычислений для скручиваемых пластин и круглых стержней, найденные с применением разных методов расчета, включая расчет в программном комплексе ANSYS, удовлетворительно согласуются друг с другом и с данными экспериментов для ряда алюминиевых и титановых сплавов.

В четвертой главе на основе кинетических уравнений ползучести и поврежденности выполнен анализ разных кинематических и статических режимов деформирования стержней и тонкостенных оболочек. Показано, что режим, при котором повреждения минимальны, зависит от вида зависимости деформации при разрушении от напряжения на диаграммах ползучести «деформация–время». Решена задача формообразования в условиях упругопластичности и ползучести за заданное время круглой листовой заготовки в полусферическую оболочку. Для решения разработаны два метода расчета: путем компиляции в пакет ANSYS подпрограммы на языке Fortran для учета поврежденности и по методике, основанной на решении уравнения равновесия безмоментной оболочки. Для стали марки 09Г2С-12, используемой для изготовления сосудов отстойников на Жамбылском заводе металлоконструкций, получено, что все режимы приводят практически к одному и тому же уровню накопления повреждений, для сплава ВТ9 рекомендованы кинематические режимы с постоянной скоростью деформирования, для АК4-1 наилучшие режимы – статические с кусочно-линейным изменением давления.

В пятой главе на основе кинетических уравнений ползучести и поврежденности исследована длительность до разрушения кольцевых пластин и вращающихся дисков гиперболической формы. Развит подход сведения задачи неустановившейся ползучести к аналогичной задаче в предположении установившейся ползучести материала. Временем начала разрушения считается момент, когда в какой-либо точке конструкции

параметр поврежденности достигает критического значения. Для изгибаемых моментом кольцевых пластин расчет с использованием критериев Треска–Сен-Венана (максимального касательного напряжения) и Мизеса (Каца) показал, что расчетное время до начала разрушения существенно зависит от выбора критерия длительной прочности. Для вращающегося и растягиваемого диска гиперболической формы выполнен расчет длительности до разрушения с учетом стадии распространения фронта разрушения. Получено, что отношение продолжительности стадии распространения фронта разрушения к продолжительности стадии скрытого разрушения зависит от геометрии конструкции, используемых критериев разрушения, выбора варианта теории ползучести и может составлять от нескольких процентов до нескольких десятков процентов. Показано, что по сравнению с моделью ползучести Ю.Н. Работнова расчет по модели ползучести Л.М. Качанова занижает продолжительность первой стадии и общее время разрушения с учетом стадии распространения фронта разрушения. Апробация метода на примере растягиваемых плоских пластин с круговым отверстием из алюминиевого сплава Al-Mg-Si показала удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных, полученных с использованием критерия Хейхерста.

В заключении содержится краткий обзор основных результатов и рекомендации по их практическому применению.

Научная новизна результатов и выводов.

Все полученные результаты новые и оригинальные. Модель кинетических уравнений ползучести со скалярным параметром поврежденности обобщена на случай материалов, предельная деформация которых в зависимости от напряжения на графиках кривых ползучести может быть непостоянной величиной. Разработаны модели для изотропных и ортотропных материалов, разносопротивляющихся растяжению и сжатию при ползучести. Отличительной особенностью моделей является возможность описывать процессы деформирования функциями с различными степенными показателями для растяжения и сжатия, что делает моделирование процессов формообразования более точным. С использованием построенных моделей на основе разработанных соискателем расчетных алгоритмов и известных программных комплексов решен ряд прямых и обратных задач формообразования стержней, гладких и оребренных панелей, оболочек, получен ряд новых аналитических решений. Выполнена экспериментальная проверка моделей. Даны рекомендации по

выбору медленных режимов деформирования способствующих снижению повреждений материала на стадии производства. Предложены и апробированы экспериментально новые методики расчета дополнительного срока эксплуатации конструкций.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Все положения и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы численно и экспериментально, снабжены подробными математическими выкладками. Достоверность обеспечивается корректным использованием методов вычислительной математики, вариационного исчисления, механики деформируемого твердого тела, сравнительным анализом решений, найденных разными методами, сопоставлением с известными аналитическими решениями, полученными другими авторами, и с данными экспериментов.

Значимость результатов для науки и производств, рекомендации по их использованию

Результаты имеют важное теоретическое и прикладное значение в области моделирования процессов обработки материалов давлением в медленных режимах ползучести и сверхпластичности для уменьшения поврежденности и сохранения ресурса изделий на стадии изготовления. Развитые новые модели теории ползучести для изотропных и ортотропных материалов дают возможность математически более корректно описывать поведение сплавов, применяемых при проектировании элементов конструкций. Предложенный метод расчета длительности до разрушения, учитывающий стадию распространения фронта разрушения, может быть рекомендован для оценки дополнительного срока эксплуатации конструкций.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы в учебном процессе и в научных исследованиях, а также на предприятиях аэрокосмической области, судостроения, общего машиностроения (АО «НовосибНИАТ», филиалы ПАО "Компания "Сухой" Новосибирский авиационный завод им. В.П. Чкалова и Комсомольский-на-Амуре авиационный завод им. Ю.А. Гагарина, научно-технический центр «НТЦ-Ползучесть»). Исследования получили применение при изготовлении технологической оснастки на ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю. А. Гагарина».

По диссертации и автореферату имеется несколько замечаний:

1. В диссертации в п.1.3 на рисунке 1.9 представлены диаграммы накопления деформаций и повреждений, а также зависимость напряжений от времени, вычисленные при растяжении стержней с постоянной скоростью деформирования (стр. 62-64). Однако решаемая система уравнений не выписана. По всей видимости, эта система аналогична той, которая приводится в п. 1.4 на стр. 69.

2. В п. 5.1 обсуждаются механизмы разрушения при ползучести и рассматривается решение задачи растяжения стержня с защемленными торцами с образованием шейки. Необходимо отметить, что в какой-то момент времени в области утонения напряжения начинают существенно превосходить предел упругости и появляются пластические деформации, после этого разрушение развивается практически мгновенно. При моделировании этот факт никак не учитывается и не выяснено его влияние на время разрушения.

3. В IV главе при выборе температурно-скоростного режима при одноосном растяжении автор ставит и решает несколько задач, в том числе определение режима нагружения при отсутствии пластических деформаций (стр. 184). Этому аспекту в диссертации уделяется недостаточное внимание.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Результаты диссертации в достаточной степени *апробированы и опубликованы*. Исследования были широко представлены на Всероссийских и Международных конференциях, опубликовано 17 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 6 статей, индексируемых в WEB of Science и Scopus, получены два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, полученные И.А. Банщиковой результаты можно квалифицировать как новое крупное достижение. По своим целям, задачам, методике исследования и научной новизне диссертация соответствует пунктам 1, 2, 5–9 паспорта специальности 01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела. Так как работа нацелена на развитие кинетических уравнений ползучести и длительной прочности и на решение с их использованием задач формообразования и длительного разрушения элементов конструкций, то по научной новизне и методам исследования она может быть отнесена к физико-математическим наукам.

Оформление и соответствие авторефера та содержанию диссертации

Оформление и соответствие автореферата содержанию диссертации

Работа оформлена в соответствии с требованиями системы стандартов, предъявляемых к диссертации и автореферату диссертации. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы, ее результаты и выводы.

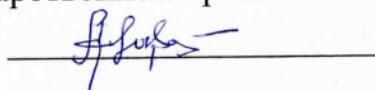
Заключение о соответствии работы требованиям ВАК

Диссертация «Ползучесть изотропных и ортотропных сплавов и длительная прочность элементов конструкций» является законченной научно-квалификационной работой, направленной на решение актуальных проблем формообразования в медленных режимах элементов конструкций и прогнозирования их эксплуатационного ресурса, имеет важное теоретическое и прикладное значение, соответствует требованиям п.п. 9 –14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями и дополнениями от 1 октября 2018 г.) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор, **Банщикова Инна Анатольевна**, достойна присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Я, Локощенко Александр Михайлович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Банщиковой И.А.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела, профессор, заведующий лабораторией ползучести и длительной прочности НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, лауреат Государственной премии РСФСР



Локощенко Александр
Михайлович

«28» сентября 2020г.

Почтовый адрес: 119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1, НИИ механики МГУ; телефон 8(495) 939-31-21; email: loko@imec.msu.ru

Подпись профессора А.М. Локощенко заверяю

Директор НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова





Ю.М. Окунев