

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Волкова Александра Евгеньевича на диссертацию Саитовой Регины Ринатовны на тему «Высокотемпературная ползучесть и охрупчивание материалов в условиях длительной эксплуатации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Саитовой Р.Р. посвящена проблеме высокотемпературной ползучести металлических материалов и сплавов. Данная проблема имеет место при эксплуатации таких ответственных конструкций как космические и авиационные аппараты, а также тепловые и атомные энергетические установки. В связи с этим развитие новых подходов для описания высокотемпературной ползучести металлических материалов, которые и рассматриваются в работе, является крайне **актуальной** задачей. **Практическая значимость** диссертационной работы также не вызывает сомнений. Результаты работы могут быть использованы более точного прогнозирования длительной прочности и описания процессов ползучести и поврежденности, протекающих в металлических материалах и сплавах в условиях высоких температур.

**Новизна исследования.** В работе для описания процессов высокотемпературной ползучести сформулированы взаимосвязанные кинетические уравнения для деформации ползучести и параметра поврежденности. Учитывается сжимаемость металлических материалов, а относительное изменение плотности рассматривается как параметр сплошности. Получен критерий длительной прочности, описывающий участок хрупкого разрушения. Показано, что критерий длительной прочности Качанова-Работнова является частным случаем полученного критерия. Предложенная система уравнений способна описать третий участок кривых ползучести. Деформация ползучести, полученная из решения предложенных уравнений может накапливаться как более интенсивно, так и менее интенсивно по сравнению с величиной деформации по теории Качанова-Работнова. Предложена модифицированная система уравнений для деформации ползучести и плотности материала. Рассматриваемый подход позволяет прогнозировать изменение плотности в процессе ползучести. Рассмотрен случай двухступенчатых нагружений. Показано, что предложенная система позволяет описывать случаи ступенчатых нагружений.

Предложен метод определения величины поврежденности по экспериментальным кривым ползучести. Для описания хрупких разрушений в условиях высокотемпературной ползучести формулируется только одно кинетическое уравнение для скорости ползучести. Для описания экспериментальных кривых ползучести используются различные эмпирические зависимости. Полученные теоретические кривые качественно верно описывают экспериментальные кривые длительной прочности.

**Достоверность результатов** работы обеспечивается применением апробированных методов исследования и подтверждается согласованием теоретических результатов с экспериментальными данными, использованием феноменологических методов механики рассеянного повреждения и разрушения.

**Апробация.** Результаты работы доложены на 16 российских и международных конференциях, представлены в 19 публикациях, из которых 4 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, 7 статей опубликовано в РИНЦ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 147 источников. Объем диссертации составляет 108 страниц, в том числе 32 рисунка и 3 таблицы. Каждая глава завершается формулировкой выводов.

**Во введении** обозначена научная проблема, цели и задачи исследования, обоснована актуальность темы диссертации и новизна полученных результатов, описана методология и методы исследований, приведены положения, выносимые на защиту, а также список публикаций диссертанта по тематике диссертации.

**Первая глава** содержит обзор литературных источников, в которых отражено современное состояние экспериментальных и теоретических результатов по ползучести, длительной прочности и поврежденности металлических материалов в условиях ползучести. Особое внимание уделено рассмотрению работ, в которых были предложены различные варианты материализации параметра поврежденности непосредственно в физических измерениях. Как отмечается во многих литературных источниках наиболее представительной характеристикой пористости и поврежденности в процессе ползучести следует считать именно плотность материала. Также обзор содержит детальное описание имеющихся представлений поврежденности в скалярной, векторной и тензорной форме.

**Во второй главе** для описания процессов высокотемпературной ползучести сформулированы взаимосвязанные кинетические уравнения для деформации ползучести и параметра поврежденности. В качестве параметра поврежденности рассматривается относительное изменение плотности материала. При формулировке рассматриваемых уравнений также учитывается закон сохранения массы. Получены точные и приближенные аналитические решения этих уравнений. Предложенная система кинетических уравнений позволяет описать третий участок кривых ползучести. При этом деформация ползучести может накапливаться как более интенсивно, так и менее интенсивно по сравнению с величиной деформации, полученной по теории Качанова-Работнова. Показано, что полученный критерий длительной прочности может описывать участок хрупкого разрушения, а критерий Качанова-Работнова является частным случаем полученного критерия. В работе дано сравнение полученных решений с экспериментальными результатами по изменению пористости (плотности), ползучести и длительной прочности для различных металлов и сплавов в процессе высокотемпературной ползучести при различных температурах и уровнях нагрузки. Предложена модифицированная система кинетических уравнений для деформации ползучести и плотности материала. Получены соответствующие точные и приближенные аналитические решения для деформации ползучести, и изменения плотности.

**В третьей главе** рассматривается система взаимосвязанных кинетических уравнений для деформации ползучести и параметра поврежденности для случая двухступенчатого нагружения. При этом учитывается закон сохранения массы, а параметр поврежденности конкретизируется в виде отношения текущей величины плотности материала к начальной. Проведены экспериментальные исследования в условиях ползучести при двухступенчатом нагружении алюминиевого сплава АМг2 при температуре 250°C. Показано, что предложенная система взаимосвязанных кинетических уравнений для скорости ползучести и параметра поврежденности позволяет описывать случаи ступенчатых нагружений.

**В четвертой главе** предложен метод определения величины поврежденности по экспериментальным кривым ползучести. Рассматривается сжимаемая среда, а параметр сплошности конкретизируется как относительное изменение плотности. При этом для описания хрупких разрушений в условиях высокотемпературной ползучести формулируется только одно кинетическое уравнение для скорости ползучести. Для

описания экспериментальных кривых ползучести используются различные эмпирические зависимости. Полученные соотношения качественно верно описывают экспериментальные кривые длительной прочности.

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы, полученные в работе.

**Замечания.** По работе можно сделать следующие замечания и пожелания:

1. В первой главе работы приводится слишком подробный обзор по представлению поврежденности в векторной и тензорной форме. Однако в работе рассматривается только случай одноосного растяжения, для которого достаточно скалярного представления параметра поврежденности.
2. Описываемые в работе процессы высокотемпературной ползучести относятся к случаю одноосного растяжения. В качестве дальнейшего развития тематики диссертационной работы хотелось бы увидеть распространение предлагаемых в работе кинетических уравнений на случай сложного напряженного состояния.
3. Не описаны процедуры нахождения значений параметров разработанных моделей.
4. Используются несистемные единицы измерения, например,  $[\text{МПа}]^{-2} [\text{ч}]^{-1}$ .

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертация Саитовой Регины Ринатовны на тему: «Высокотемпературная ползучесть и охрупчивание материалов в условиях длительной эксплуатации» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Саитова Регина Ринатовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры теории упругости СПбГУ



Волков А.Е.

Дата 28.09.2023