

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Каплунова Юлия Давидовича 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 описанию деградационных процессов металлических материалов при длительных температурно-силовых воздействиях. Известно, что работоспособность металлов определяется процессами поврежденности, которые способствуют охрупчиванию материала и возникновению эффекта тепловой хрупкости. При этом установлено, что явление тепловой хрупкости свойственно всем металлическим материалам и связано с процессами накопления пористости по границам зерен по механизму диффузии вакансий и зернограничного проскальзывания. В работе эти процессы рассматриваются феноменологически с использованием методов механики рассеянного повреждения и разрушения. При формулировке уравнений ползучести и критерия длительной прочности в области хрупких разрушений учитывается условие сжимаемости и формулируются реологические соотношения ползучести и критерии длительной прочности, основываясь на законе сохранения массы. В качестве параметра поврежденности рассматривается необратимое изменение плотности (разрыхление) материала. С учетом этих предположений в работе сформулированы связанные уравнения для параметра поврежденности и деформации ползучести, получены соответствующие приближенные и точные решения этих уравнений для разных условий одноосного нагружения и проведено сопоставление с результатами экспериментальных исследований.

Актуальность работы определяется тем, что выполненные исследования вносят существенный вклад в теорию континуального разрушения. Полученные результаты могут быть использованы для более точного описания процессов ползучести, поврежденности и длительной прочности, протекающих в металлических материалах и сплавах в условиях длительной высокотемпературной ползучести.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 147 наименований. Общий объем работы составляет 108 страниц, в том числе 32 рисунка.

В первой главе приведен обзор имеющихся в литературе экспериментальных и теоретических результатов по ползучести, длительной прочности, изменению пористости (плотности) металлических материалов, а также по поврежденности, рассматриваемой в скалярной, векторной и тензорной форме.

№ 33-06-1203 от 02.10.2023

Во второй главе сформулирована система кинетических уравнений для параметра поврежденности и деформации ползучести с учетом закона сохранения массы и интерпретации параметра поврежденности как относительного изменения плотности. Получены точные, приближенные аналитические и численные решения рассматриваемой системы кинетических уравнений, и сформулирован критерий длительной прочности. Построены кривые поврежденности, деформации ползучести и длительной прочности. Приведено сравнение полученных теоретических результатов с соответствующими экспериментальными результатами.

В третьей главе модифицированная система кинетических уравнений рассмотрена для случая двухступенчатого нагружения. Представлены экспериментальные исследования одноосного напряженного состояния в условиях ползучести при двухступенчатом нагружении для алюминиевого сплава АМг2 при температуре 250°C, и проведено сравнение полученных экспериментальных кривых с теоретическими кривыми ползучести. Таким образом, предложенная схема позволяет описывать случаи ступенчатых нагружений, что говорит о ее универсальности.

В четвертой главе предложен метод определения величины поврежденности по экспериментальным кривым ползучести для сжимаемой среды. Сформулировано кинетическое уравнение для скорости ползучести с целью описания хрупких разрушений в условиях высокотемпературной ползучести. Параметр сплошности определен из рассматриваемого кинетического уравнения и выражается через скорость и деформацию ползучести. Для описания экспериментальных кривых используются эмпирические зависимости в виде степенных и экспоненциальных функций. Получены теоретические кривые сплошности и критерий длительной прочности, последний при условии, что параметр сплошности достигает критической величины. Построены теоретические кривые длительной прочности. Полученные соотношения качественно верно описывают экспериментальные кривые длительной прочности.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием современных методик исследования, воспроизводимостью экспериментов, применением опробированных феноменологических подходов в области механики рассеянного повреждения и разрушения, а также согласованностью основных выводов с современными научными представлениями.

Практическая значимость работы связана с возможностью использования полученных результатов при прогнозировании поведения металлических материалов и конструкций в условиях высокотемпературной ползучести и оценке характеристик длительной прочности.

Высказанные ниже замечания носят рекомендательный характер и не оказывают влияние на общее положительное впечатление.

1. В списке литературы отсутствуют ссылки на работы, имеющие непосредственное отношение к теме диссертации:

Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Демьянушко И.В. Термопрочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. — 455 с.

Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с.

2. При получении приближенных аналитических решений связанной системы кинетических уравнений для случая хрупкого разрушения и малых деформаций

используется разложение экспоненты в ряд Тейлора. Представляется, что применение метода возмущений могло бы оказаться полезным для изучения такой задачи.

3. В четвертой главе рассмотрен вариант теории, в котором процессы ползучести и поврежденности развиваются параллельно и в первом приближении считается, что поврежденность является результатом деформации. Параметр поврежденности входит в кинетическое уравнение для скорости деформации ползучести, согласно закону сохранения массы, и дополнительно используются эмпирические зависимости для деформации ползучести. Использование данных уравнений позволяет определить временную зависимость параметра сплошности и сформулировать соответствующий критерий длительной прочности на основе заданного предельного значения поврежденности. В этой задаче, вероятно, есть потенциал для использования Data Science и регрессионного анализа.

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.

Член диссертационного совета

д.ф.-м.н. проф.



Ю.Д. Каплунов

Профессор Кильского университета

Великобритания

25 сентября 2023