

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Фрейдина Александра Борисовича на диссертацию Чжао Шисяна на тему «Моделирование динамической пластичности металлических материалов под воздействием ударных нагрузок: эффект скорости воздействия и термическое разупрочнение», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация Чжао Шисяна посвящена исследованиям пластичности металлических материалов при высокоскоростных воздействиях. Целью работы является разработка и реализация релаксационной модели пластичности, нацеленной на объяснение скоростной чувствительности необратимого деформирования и термического разупрочнения металлов с помощью концепции инкубационного времени и позволяющей объяснить ряд эффектов, экспериментально наблюдаемых при высокоскоростных воздействиях на металлические материалы.

В задачи работы входил сравнительный анализ существующих моделей, описывающих скоростные эффекты пластичности и термическое разупрочнение, анализ и развитие релаксационной модели пластичности, изучение связи между температурой и инкубационным временем, разработка вычислительной схемы для реализации развитой модели применительно к задачам динамической пластичности с использованием метода конечных элементов.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью развития моделей деформирования и разрушения материалов при экстремальных воздействиях и необходимостью развития подходов, которые могли бы с единых позиций описывать и предсказывать поведение материалов в широком диапазоне скоростей воздействия. Разработка математических моделей пластического деформирования, учитывающих скорости воздействия, важна, в том числе, для прогнозирования поведения конструктивных элементов автомобиля при столкновениях, элементов самолета при аварийных посадках и столкновении с птицами, и в целом, для работы систем, обеспечивающих безопасность пассажиров. Высокоскоростные воздействия являются также элементами технологических процессов таких как резание и должны учитываться при конструировании соответствующих инструментов.

Научная новизна и теоретическая значимость работы состоят в разработке и верификации новой релаксационной модели пластического деформирования, согласно которой скоростная чувствительность материала рассматривается в широком диапазоне скоростей деформации и температуры как проявление более общей временной чувствительности, демонстрирующей температурно-временное соответствие. Результаты работы расширяют понимание динамической пластичности и повышают предсказательную точность моделирования.

Практическая значимость работы определяется тем, что развиваемая концепция инкубационного времени может быть применена в инженерной практике при разработке стандартов для динамических испытаний различных материалов и предсказания поведения элементов конструкций при ударных воздействиях. Разработка математических моделей пластического деформирования, учитывающих скорости воздействия, важна, в том числе, для прогнозирования поведения конструктивных элементов автомобиля при столкновениях, элементов самолета при аварийных посадках и столкновении с птицами, и в целом, для работы систем, обеспечивающих безопасность пассажиров. Высокоскоростные воздействия являются также элементами технологических процессов таких как резание и должны учитываться при конструировании соответствующих инструментов.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, приложений, списка литературы из 109 наименования и изложена на 133 страницах.

Введение содержит постановку задач исследования, обоснование актуальности темы, новизны, достоверности, научной и практической значимости работы, формулировку целей исследования, кратко представляет методологию и методы исследования и хорошо представляет диссертацию в целом.

Обзор литературы отражает проблему и анализ текущего состояния исследований, касающихся темы диссертации, включая как теоретические и вычислительные аспекты и проблемы моделирования, так и описание ключевых экспериментов.

В первой главе представлен критический анализ существующих моделей динамической пластичности начиная с феноменологических моделей и заканчивая моделями механики дислокаций и моделью нейронной сети.

Вторая глава представляет релаксационную модель пластичности. Предложена модификация релаксационной модели пластичности, сформулированной ранее Ю.В. Петровым. В частности, для монотонного нагружения реализован инкрементный вариант релаксационной модели пластичности (ИРП). Введено в рассмотрение температурно-временное соответствие – зависимость между температурой и инкубационным временем. Предложена методика исследования температурно-временного соответствия. Для анализа этого соответствия предложено использовать коэффициент относительных напряжений, относящий напряжение при скоростном деформировании к соответствующему напряжению при квазистатическом деформировании. Модель объяснила экспериментально наблюдаемый эффект разупрочнения, вызванного быстрой пластической деформацией и адиабатическим повышением температуры во время деформирования, что приводит к уменьшению характерного инкубационного времени. Сделан вывод об ограниченности применимости распространенной мультипликативной модели для моделирования в широком диапазоне температур и скоростей деформирования.

В третьей главе развита методика численной реализации модели, основанная на конечно-элементном анализе. Разработана вычислительная схема для решения задач динамической пластичности в парадигме концепции инкубационного времени. Описание расчетной схемы предваряется обширным введением в основные подходы и алгоритмы применения метода конечных элементов в динамических задачах. Описана реализация расчетной схемы в программном пакете ABAQUS.

В четвертой главе представлены результаты расчетов по различным моделям, проведено сравнение расчетных результатов с имеющимися экспериментальными данными для различных материалов и дан сравнительный анализ моделей. Для анализа скоростной зависимости предела текучести рассмотрены «первоначальная» и модифицированная модели релаксационной пластичности, инкрементный вариант модели релаксационной пластичности (ИРП), модель Джонсона – Кука. Показано, что скоростная зависимость предела текучести лучше всего описывается ИРП-моделью.

Затем исследована термомеханическое поведение с использованием ИРП-модели и температурно-временного соответствия. И, наконец, приведены результаты, полученные с помощью модели искусственной нейронной сети. Достаточно подробно обсуждены особенности моделирования нейронной сетью.

В заключении суммируются результаты работы.

Таким образом, диссертационная работа является интересным и важным развитием концепции инкубационного времени в механике неупругого деформирования. В ней разработана и апробирована новая модель для описания динамической пластичности, проделан

сравнительный анализ существующих моделей и новой модели и проведен анализ экспериментальных данных, важный не только для данной работы, но и для дальнейшего развития теории.

По работе имеются вопросы и замечания:

1. При построении модели и формулировки зависимостей параметров модели от температуры автора интересует случай, когда при повышении температуры происходит разупрочнение, а не упрочнение. Есть ли понимание физических причин такого разупрочнения? И как причины разупрочнения соотносятся с причинами упрочнения?
2. На Рис. 4.5 приведены диаграммы деформирования для разных температур (от низких до высоких) при двух достаточно больших скоростях деформирования, рассчитанные с помощью разных моделей в сравнении с экспериментальными данными. Теоретические зависимости построены с учетом температурного эффекта адиабатического деформирования, описываемого формулой (4.2). При этом даже при низкой температуре именно модель ИРП описывает наблюдаемый эффект разупрочнения, в отличие от других моделей. Почему добавки (4.2) достаточно для объяснения эффекта разупрочнения в модели ИРП и почему это не работает в других моделях?
3. Во введении при общем описании диссертации автор пишет на стр. 12, что результаты представлены в шести работах, но приводит только три статьи, индексируемые в базах данных WoS и Scopus. Остальные статьи читателю диссертации приходится искать в общем списке литературы.
4. Автор неоднократно ссылается на формулы, появляющиеся после текста со ссылкой, что не является общепринятым и иногда затрудняет чтение.

Два последних замечания касаются только оформления работы. В тексте диссертации также есть простительные стилистические погрешности и опечатки.

Эти замечания не имеют квалификационного значения. Работа обладает внутренним единством, сочетанием теоретических результатов и анализа их соответствия экспериментальным данным. Результаты достойно представлены в высокорейтинговых публикациях (6 статей, три из которых входят базы данных Scopus и WoS: две статьи – Q1, одна статья – Q2), хорошо апробированы на международных и Российских конференциях (лучший секционный доклад на XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург, 2023).

Диссертация Чжао Шисяна на тему: «Моделирование динамической пластичности металлических материалов под воздействием ударных нагрузок: эффект скорости воздействия и термическое разупрочнение» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Чжао Шисян 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

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией математических методов механики материалов Института проблем машиноведения РАН



А.Б. Фрейдin

29.05.2025