

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Плехова Олега Анатольевича на диссертацию
Селютиной Нины Сергеевны на тему
«Динамическая деформация и разрушение материалов на основе
релаксационных моделей необратимого деформирования», представленную
на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела

Актуальность темы диссертационных исследований

Развитие единых модельных представлений о процессах деформирования и разрушения конструкционных материалов в широком диапазоне скоростей деформирования является актуальной задачей механики деформированного твёрдого тела. Развитие вычислительной техники создало иллюзию возможности моделирования процессов разрушения при высоких скоростях деформации с использованием простых моделей. Например, встроенная в коммерческие пакеты модель Джонсона-Кука очень часто используется при скоростях деформирования существенно больших, чем диапазон её верификации (10^3 - 10^4 с⁻¹). Автор работы убедительно показала перспективу развития теории инкубационных времён разрушения для построения модели с минимальным числом материалов констант, позволяющей моделировать процессы разрушения в широком диапазоне скоростей деформации. Предложенный формализм обладает высоким потенциалом обобщения и позволил автору описать процессы динамического деформирования и разрушения природных, в том числе влагонасыщенных материалов, композиционных материалов, а также процесс циклического деформирования.

Безусловным достоинством работы является возможность легко проводить аналитические инженерные оценки с использованием предложенного формализма. В результате полученные результаты имеют

большое практическое значение и могут быть непосредственно использованы при решении задач минимизации рисков возникновения аварийных ситуаций при динамическом деформировании инженерных конструкций.

Полученные результаты являются новыми, перспективными и будут интересны для широкого круга специалистов, работающих в области механики деформируемого твёрдого тела. В связи с вышеизложенным, **актуальность** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Содержание работы

Представленная к оппонированию диссертационная работа Н.С. Селютиной состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Список процитированной литературы содержит 221 источник. Объем диссертационной работы составляет 244 страниц. Работа иллюстрирована 85 рисунками и 30 таблицами.

Во введении описана структура и объем диссертации, отмечена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, степень их проработанности, перечислены положения, выносимые на защиту, подчеркнута их новизна, достоверность, степень апробации, раскрыта теоретическая и практическая значимость, степень опубликованности результатов в периодической научной печати и охарактеризован личный вклад соискателя.

Первая глава диссертации с использованием структурно-временного подхода исследованы скоростные зависимости динамической прочности горных пород и бетона в широком диапазоне скоростей деформации. Проведено сравнение и обсуждение временных зависимостей (прочность – скорость деформации; амплитуда импульса – длительность импульса; максимальное напряжение – длительность импульса) откольной прочности при коротких импульсных нагрузках и высокоскоростном нагружении сухого и насыщенного бетона. Доказано, что разработанная структурно-временная модель разрушения с инкубационным временем применима для широкого диапазона типов и форм импульсов нагрузки. Исследованы скоростные

зависимости прочности фибробетона при увеличении процентного содержания стального спирального волокна. Показано, что параметр инкубационного времени можно считать удобным инструментом для оценки влияния волокна на динамическую прочность фибробетонов.

Проведено сравнение силового и энергетического предельных критериев динамического разрушения горных пород. На примере динамического разрушения угля и гранита показано, что определяемое по силовому критерию инкубационное время не зависит от длины разреза образца.

Во второй главе на основе критерия инкубационного времени текучести и эмпирических моделей Джонсона-Кука и Купера-Саймондса исследовано поведение предела текучести стали и ряда алюминиевых сплавов в широком диапазоне скоростей деформации. Показана, независимость характеристик критерия инкубационного времени текучести от истории нагружения и их связь со структурно-временными особенностями процесса пластического деформирования, а также возможность определения предела текучести в более широком, чем для эмпирических моделей, диапазоне скоростей деформаций. С использованием построенной релаксационной модели пластического деформирования показана возможность в рамках единого подхода моделировать любой набор деформационных кривых, как монотонных, с изменяющимся пределом текучести, так и немонотонных, с появляющимся и изменяющимся зубом текучести.

На основе предлагаемой релаксационной модели исследуется влияние скорости деформации на нестабильность откликов металлов к динамической нагрузке в диапазоне скоростей деформации 10^{-3} – 10^4 с⁻¹. Показано, что релаксационная модель пластичности является эффективным и удобным инструментом для расчета некоторых основных эффектов динамической пластичности, возникающих в широком диапазоне скоростей деформации.

В третьей главе для прогнозирования эффекта «зуба текучести» с учетом различных динамических, температурных или других факторов

рассмотрен широкий спектр начальной пластической стадии диаграмм деформации однородных материалов. Помимо группы монотонных диаграмм, различающихся только пределом текучести, на основе релаксационной модели пластичности прогнозируется группа из трех немонотонных диаграмм, с появлением или исчезновением эффекта падения текучести при разных скоростях деформации. Показано, что в отличие от классических моделей динамической пластичности, способных строить только первый набор диаграмм, релаксационная модель пластичности позволяет прогнозировать любой набор деформаций. На основе экспериментальных данных построен прогноз динамических зависимостей деформации с падением текучести при фиксированной скорости деформации для различных металлов.

В четвёртой главе предложена структурно-временная модель циклического нагружения. Эффективное прогнозирование деформационного поведения позволило модель циклического нагружения при произвольном законе деформирования в конкретном цикле. Показано, что разработанная ранее для однократного нагружения релаксационная модель пластического деформирования способна прогнозировать эффект стабилизации. Введённый временной чувствительности материала может эффективно учитывать способ обработки материала. Экспериментально исследовано явление стабилизации пластической деформации при жестком нагружении в зависимости от амплитуды и скорости нагружения. Предсказана зависимость напряжения от деформации и эффект стабилизации пластической деформации на основе ширины гистерезиса.

В пятой главе диссертации исследован процесс деформирования композитных слоистых материалов, металлических многослойных композитов, усиленных полимерными волокноэпоксидными слоями, и их компонентов при статических и динамических нагрузках. Предложена модель релаксации слоистых композитов эффективно описывает необратимую деформацию композита и момента его разрушения. Верификация модели проведена на примере металлопластиков с различным соотношением

толщины слоя металла и полимера: алюминиевого композита, армированного стекловолокном, титанового композита, армированного стекловолокном, алюминиевого композита, армированного углеродным волокном, алюминиевого композита, армированного кевларовым волокном. Показано, что различные кривые деформации металлокомпозитов в зависимости от скорости деформации, заканчивающиеся хрупким разрушением полимерных слоев или продолжающейся необратимой деформацией остающихся неразрушенными слоев металла с разрушенными полимерными (волокнистыми/эпоксидными) слоями, можно прогнозировать в широком диапазоне скоростей деформации на основе релаксационной модели пластичности, обобщенной для гетерогенных материалов.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам выполнения диссертационного исследования и рекомендации к их практическому использованию, среди которых необходимо отметить:

- анализ скоростных зависимостей прочности горных пород, бетона, мерзлого грунта;
- определение скоростных зависимостей вязкости разрушения и энергии деформации горных пород при испытаниях на трехточечный изгиб и результаты исследований процентного содержания водонасыщенности горных пород на их скоростную чувствительность при испытаниях на трехточечный изгиб;
- результаты исследования скоростных зависимостей и характерного времени релаксации для стали и ряда алюминиевых сплавов;
- сравнительный анализ скоростных зависимостей и деформационных откликов материала, прогнозируемых предлагаемой релаксационной моделью пластичности и другими динамическими моделями пластичности Джонсона-Кука, Зерилли-Армстронга, Русинека-Клепачко и их модификаций;
- результаты исследований эффектов стабилизации пластической деформации с конечной упругой стадией деформирования и на петле

гистерезиса в испытаниях на малоцикловую усталость на марках стали 50 и стали 45, соответственно, на основе предлагаемой релаксационной модели пластичности для циклического деформирования;

- анализ многостадийности статических и динамических деформационных зависимостей композитов-ламинатов различной толщины и составляющих материалов.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертантом справедливо сформулированы следующие пункты научной новизны.

Пункт 1. Дано объяснение динамическим эффектам прочности двух структурно различных материалов, задаваемых процентным содержанием воды в образце или типом армирования, на основе силового структурновременного критерия разрушения.

Пункт 2. Установлены влияния: 1) водонасыщенности структурно различных бетонов и горных пород, 2) соотношения воды к цементной пасте бетонов, 3) массовой доли льда мерзлого грунта, 4) материала и формы армирующего волокна фибробетонов – на инкубационное время разрушения, характеризующего скоростную чувствительность материала.

Пункт 3. Предложена релаксационная модель пластичности для прогнозирования монотонных и немонотонных деформационных зависимостей гомогенного материала при различных скоростях деформации.

Пункт 4. Установлены схемы определения параметров релаксационной модели пластичности по деформационным зависимостям материала. Установлены типы деформационных реакций материала на нагрузку, обусловленные различными скоростями деформирования, температурами, размерами зерен, которые может моделировать релаксационная модель пластичности.

Пункт 5. Показано, что предлагаемая релаксационная модель пластичности для гомогенных материалов в широком диапазоне скоростей

деформации основана на использовании инвариантных параметров модели к истории нагружения материала. Обосновано отсутствие полной инвариантности параметров других динамических моделей пластичности к истории нагружения материала.

Пункт 6. Предложена модель циклического деформирования для прогнозирования эффектов стабилизации пластической деформации и полной деформационной зависимости, на основе релаксационной модели пластичности, дополненной условием разгрузки.

Пункт 7. Разработана релаксационная модель необратимого деформирования и разрушения для гетерогенных материалов. На примере металлических композитов-ламинатов показано, что разработанная модель прогнозирует многостадийность необратимого деформационного процесса при различных соотношениях толщин металлических и полимерных слоев ламината и учитывает возникающую не монотонность процесса деформирования, как при статических, так и при динамических нагрузках.

Анализ **обоснованности и достоверности** полученных результатов позволяет утверждать, что результаты диссертации получены с использованием современных физико-математических моделей, математических методов и алгоритмов. Моделирование рассматриваемых процессов выполнено с соблюдением всех принципов вычислительной математики. Полученные результаты достоверны и не противоречат общефизическим принципам и ранее опубликованным данным.

Результаты диссертации **обсуждались** на всероссийских и международных конференциях, полнота их опубликования соответствует требованиям Совета.

Научная и практическая ценность результатов

Н.С. Селютиной получены новые научные результаты, которые вносят вклад в развитие методов механики деформируемого твёрдого тела,

понимание основополагающих процессов динамического деформирования и разрушения природных и искусственных материалов.

Практическая значимость работы состоит в создании математических моделей и практических рекомендаций для решения вопросов оценки деформационных свойств широкого класса материалов при динамическом нагружении.

Список замечаний по диссертации

1. В предложенной модели делается предположение о возможности процесса разрушения (начала пластического течения) при характерных временах как меньше, так и больше инкубационного времени. Что с физической точки зрения означает возможность реализации процесса при временах меньших, чем инкубационное время, если следовать трактовке этого времени как характерного времени подготовки структуры материала?
2. В работе практически отсутствуют экспериментальные данные с доверительными интервалами в результате инкубационные времена по таким данным определяются точно (как правило с точностью до двух значащих цифр). Насколько это соответствует реальности с учётом естественного разброса свойств исследуемых материалов и разброса измерений экспериментальных данных?
3. Автор объективно и убедительно показала возможность описания широкого класса деформационных процессов и процессов разрушения конструкционных материалов с помощью введения единственного времени инкубации для гомогенного материала. Введённое время отражает как химический состав, так и начальную структуру материала. В процессе деформирования материал обычно рассматривается как иерархическая многоуровневая система, при этом в процессе деформирования происходит существенное изменение структуры материала. Будет ли инкубационное время константой материала в процессе деформирования с учётом эволюции его структуры? Можно ли

связать введённое время с конкретным структурным уровнем рассматриваемых материалов и/или характерным линейным масштабом процесса?

Замечания, высказанные по работе, носят дискуссионный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Структура диссертации обладает внутренней логикой. Стил ь изложения материала диссертации – ясный, количество ошибок стилистического и орфографического характера минимально. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне данная диссертационная работа соответствует пунктам «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых», «Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела» паспорта специальности 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела.

Введение диссертации удовлетворительно отражает содержание диссертации и опубликованные работы. Уровень апробации результатов работы (публикации в международных научных журналах и выступления на конференциях) – соответствует самым высоким требованиям.

Заключение о соответствии работы

п. II 9. Положения о присуждении учёных степеней

Принимая во внимание всё вышеизложенное, считаю, что диссертация Нины Сергеевны Селютиной является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение ряда актуальных научных задач механики деформируемого твёрдого тела.

На основании анализа содержания рукописи диссертации можно сделать заключение, что диссертация Н.С. Селютиной «Динамическая деформация и разрушение материалов на основе релаксационных моделей необратимого деформирования» полностью соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения

ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Селютина Нина Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Член диссертационного совета,
доктор физико-математических наук
(специальность 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела), член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН)

Адрес: ПФИЦ УрО РАН, 614990,
г. Пермь, ул. Ленина, 13а.

e-mail: poa@icmm.ru

Тел. +7 (3422) 12-60-08.

Плехов Олег Анатольевич

Дата 30.10.2023



Подпись О.А. Плехова заверяю:

Главный учёный секретарь

ПФИЦ УрО РАН

Вотина Анастасия Григорьевна