

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Ерёмина Михаила Олеговича «Моделирование эволюции напряжённо-деформированного состояния нагружаемых геосред и твёрдых тел как нелинейных динамических систем», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

Диссертационная работа М.О. Еремина посвящена исследованиям в актуальной области механики деформируемого твердого тела – развитию методов и подходов для описания поведения твердых тел и геосред в поле приложенных напряжений с учетом пространственно-временной локализации деформации и потери устойчивости при переходе к макроразрушению. Актуальность проведения подобных исследований обеспечивается накопленным опытом в прогнозе катастрофических явлений, реализующихся на различных пространственных масштабах (от лабораторного масштаба, региональных техногенных и природных сейсмических событий до сильных землетрясений), который указывает на необходимость переосмысления первопричины появления подобных катастроф – механизмов деформирования геосред и твердых тел как иерархических нелинейных открытых динамических систем.

Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка цитируемой литературы из 143 источников и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, научная и практическая значимость результатов, отражены основные положения, выносимые на защиту, а также личный вклад автора и обоснованность достоверности полученных результатов.

Первый раздел работы посвящен введению в проблему и описанию теоретических идей и подходов, положенных в основу разработанной в рамках диссертационного исследования модели эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) нагружаемых геосред и горных пород. Базовыми подходами, используемыми в работе, являются подходы нелинейной динамики и физической мезомеханики. При изложении подходов нелинейной динамики автор делает акцент на важности обратных связей, как положительных, так и отрицательных, которые обеспечивают эволюцию открытой термодинамической системы (которой является деформируемое твердое тело) в виде последовательности метастабильных состояний. Центральным положением парадигмы физической мезомеханики, достаточно подробно описанным в работе, является иерархическая природа деформации и разрушения твердых тел. Отмечается, что процессы неупругой деформации и разрушения развиваются подобным образом на всей иерархии масштабов, начиная от масштабов, соизмеримых с межатомными расстояниями, вплоть до макроспического масштаба, подобным образом.

Во втором разделе представлена математическая постановка задачи деформирования и разрушения твердых тел и сред. Достаточно подробно и убедительно обсуждается формулировка определяющих соотношений для двух случаев: квазихрупкой среды и упругопластической среды с дислокационной кинетикой пластических сдвигов. Центральным моментом в построении определяющих соотношений и работы в целом является введение функции деградации прочности среды, зависящей от вида НДС и истории нагружения.

ВХ № 31016 / 302.9  
ПОСТУПИЛ В ТГУ  
\* 11 \* 06 \* 2014

Формулировка вида функции деградации, основанная на идее Орована, позволила в итоге получить лавинообразный характер развития поврежденности (режим с обострением) на заключительной стадии деформирования при решении ряда численных задач. В качестве численного метода для решения задач динамики деформируемого твердого тела выбран метод М.Л. Уилкинса, приведен используемый в методе шаблон и конечно-разностные аналоги соотношений разработанной математической модели. Представлены результаты идентификации и верификации построенной модели деформирования и разрушения твердых тел и сред на основе экспериментов на трехточечный изгиб образцов габбро. Получено хорошее количественное соответствие расчетных времен обострения и экспериментальных данных о временах разрушения для различных уровней приложенной нагрузки. Проведено тестирование построенной модели деформируемого твердого тела на задаче одноосного деформирования и разрушения кубических образцов пористой керамики. Рассмотрены два вида морфологии порового пространства – перекрывающиеся сферические поры и перекрывающиеся сферические тела. Полученная в результате численных расчетов зависимость предела прочности от пористости для каждого из типов порового пространства хорошо коррелирует с экспериментально определенными значениями.

Исследования, представленные в третьем разделе, посвящены анализу особенностей реализации эффекта прерывистой текучести при деформировании образца алюминиевого сплава с использованием подходов нелинейной динамики. Приведены результаты численных экспериментов по одноосному растяжению образца алюминиевого сплава. Получены типичные диаграммы напряжение-деформация для случаев устойчивого и неустойчивого развития деформационного процесса. На основе анализа амплитудно-частотных характеристик флуктуаций напряжения относительно тренда показано, что в процессе деформирования, наклон спектра мощности для флуктуаций напряжений меняется от 1.5 на начальной стадии деформирования до 1 на стадии предразрушения. Этот факт указывает на переход деформируемого образца как открытой термодинамической системы от состояния динамического хаоса к состоянию самоорганизованной критичности, характеризующемуся повышенной вероятностью глобальной катастрофы (макроразрушения). Этот вывод подтверждается результатами анализа эволюции функции плотности распределения флуктуации напряжения в процессе деформирования. Показано, что функция распределения имеет «тяжелые» хвосты, вес которых увеличивается с ростом макродеформации.

Четвертый раздел посвящен моделированию эволюции складчатых областей Центральной Азии на основе разработанной модели эволюции нагруженных твердых тел и сред. В результате проведенного моделирования воспроизведена эволюция тектонических течений и напряженно-деформированного состояния складчатых областей Центральной Азии, как результата взаимодействия Евразийской плиты с обрамляющими плитами в коллизионных поясах. Впервые численно воспроизведен сейсмический процесс в Чуйско-Курайской зоне, как результат субмеридионального сжатия, вызванного Индо-Евразийской коллизией. Получено пространственное распределение сейсмических событий в Чуйско-Курайской зоне, каждое из которых является результатом локализованной в пространстве лавинообразной деградации прочностных свойств среды. Показано, что полученная последовательность сейсмических событий удовлетворяет законам

Гутенберга-Рихтера и Омори. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с инструментальными наблюдениями.

По диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. Одним из важных моментов диссертационной работы является то, что простроенная модель деформирования и разрушения хрупких тел и сред позволяет описать стадию неустойчивого лавинообразного роста поврежденности (стадию развития системы в режиме с обострением) приводящего в макроразрушению. Полученные в рамках работы режимы с обострением при численном решении модельных задач выглядят более чем убедительно и не вызывают сомнений. Однако, по мнению оппонента, в работе мало уделено внимания анализу причин реализации режима с обострением в разработанной модели. В работах Самарского А.А. и Курдюмова С.П., в которых впервые введено понятие «режим с обострением», показано, что процесс обострения – обращение в бесконечность некоторого параметра системы за конечное время (время обострения), является следствием реализации автомодельного решения соответствующего эволюционного уравнения, которое имеет вертикальную асимптоту. При математической постановке задачи деформирования и разрушения хрупких тел и сред автором работы физически обоснованно вводится функция деградации прочностных свойств, которая по факту имеет степенную зависимость от времени, но не имеет вертикальных асимптот. По-видимому, лавинообразный рост поврежденности, наблюдаемый при численном решении ряда задач, обеспечивается ветвящимся процессом сброса напряжений в локальных пространственных областях, когда каждый такой сброс напряжения в некоторой области среды (вызванный резким понижением прочности) инициирует перераспределение напряжений в окрестности этой области и вызывает ряд вторичных сбросов и т.д.

2. В работе, на основе численного моделирования эффекта прерывистой текучести в образцах алюминиевого сплава, показано, что деформируемый образец как нелинейная открытая динамическая система эволюционирует от состояния динамического хаоса к состоянию самоорганизованной критичности (СОК). Этот переход может быть обнаружен при анализе изменения формы функции плотности распределения флуктуаций напряжения и наклона спектра мощности этих флуктуаций. Однако в результате численного моделирования для 3D случая получено, что для стадии предразрушения, характеризующейся автоколебательным процессом изменения напряжения на диаграмме напряжение-деформация, показатель степени в зависимости спектра мощности от частоты равен -1 и соответствует состоянию СОК, тогда как форма функции плотности распределения флуктуаций напряжения хоть и имеет ярко выраженные «тяжелые» хвосты, но не является степенной, что, по словам самих авторов, должно наблюдаться в случае СОК. Открытым вопросом, который требует отдельного рассмотрения, является вопрос о возможности описания каждого из трех типов флуктуации напряжения (А, В, С) в рамках построенной модели, которые отличаются друг от друга не только статистическими свойствами, но и фрактальными характеристиками.

3. В разделе, посвященном моделированию сейсмического процесса в Чуйско-Курайской зоне, в результате численного расчета удалось впервые воспроизвести миграцию сейсмической (деформационной) активности. Оценки автора диссертационной работы показывают, что скорость миграции на два порядка меньше характерной скорости звука в среде. Полученный результат

является нетривиальным и очень значимым, но в работе уделено мало внимания его объяснению. Каковы физические причины и механизмы этой миграции? В работах Л.Б. Зуева на основе проведенных экспериментов показано, что процесс деформирования квазипластичных горных пород реализуется в виде «медленных» деформационные волны, скорость распространения которых на 6-7 порядков меньше характерной скорости звука. С другой стороны инструментальные полевые наблюдения показывают (согласно работам Кузьмина Ю.О., Шермана С.И. и др.), что миграция деформационных процессов в разломных зонах осуществляются посредством распространения «межразломных» и «внутриразломных» волн деформации, скорость которых, по оценкам ряда исследователей, также меньше на 6-7 порядков характерной скорости звука.

Однако отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, которая написана современным научным языком, хорошо структурирована и оформлена. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, являются обоснованными, их достоверность и новизна не вызывают сомнений.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций и других изданиях, в том числе рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских диссертаций. Автореферат правильно отражает основные положения диссертации.

Диссертация М.О. Еремина является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи, имеющей существенное значение для механики деформируемого твердого тела, в частности, для понимания механизмов разрушения твердых тел и перехода от медленной стадии дисперсного накопления повреждений к стадии лавинообразного роста дефектов и формирования очага макроразрушения, что полностью удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационная работа Еремина Михаила Олеговича в полной мере соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент: младший  
научный сотрудник  
лаборатории физических основ прочности  
Института механики сплошных сред УрО РАН  
кандидат физико-математических наук

Пантелеев Иван Алексеевич

20.05.2014 г.

Личную подпись \_\_\_\_\_  
удостоверю \_\_\_\_\_  
Специалист по кадрам \_\_\_\_\_

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт механики  
сплошных сред Уральского отделения  
Российской академии наук  
614013 Пермь, ул. Акад. Королёва, 1  
Телефон: (342) 237-84-61  
Факс: (342) 237-84-87  
Адрес сайта: <http://www.icmm.ru/index.html>  
E-mail: [mvp@icmm.ru](mailto:mvp@icmm.ru)