

О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертационную работу Б. Н. Федулова
«Нелинейные эффекты деформирования в сложных неоднородных средах»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Б. Н. Федулова представляет собой важное с прикладной точки зрения и весьма интересное с теоретической точки зрения исследование, затрагивающее различные аспекты теории определяющих уравнений, нелинейной теории упругости, теории пластичности, механики разрушения, механики зернистых материалов, механики анизотропных сред и механики композитов. Рассматриваются термомеханические эффекты и структурные изменения в материалах, а также эффекты, связанные с явлением дилатансии, наблюдаемым в зернистых средах. В работе используются и развиваются методы механики сплошных сред, основанные на введении в рассмотрение различных параметров состояния (параметра поврежденности, параметра вида напряженного состояния, параметра упрочнения и др.). Обсуждая столь разнообразный круг вопросов, автор диссертации демонстрирует высокую квалификацию, широкий научный кругозор и детальное знакомство с литературой, как теоретического содержания, так и относящейся к области экспериментальной механики.

В настоящее время, как в теории пластичности, так и в механике разрушения нет единых общепринятых подходов. По сути, теория пластичности представляет собой множество различных теорий, некоторые из

которых основаны на микроструктурных подходах, в то время как другие являются чисто феноменологическими. Существует множество критериев пластичности, причем большинство из них – это чисто эмпирические зависимости, имеющие достаточно сложный вид. Каждый критерий пластичности хорошо описывает определенный класс материалов, и, как правило, выбор подходящего критерия пластичности для описания какого-либо нового материала представляет собой очень непростую задачу. Отчасти это связано с тем, что при экспериментальном исследовании удается реализовать только определенные весьма простые виды нагружения, а в случае более сложных нагрузений, возникающих в процессе эксплуатации, материалы начинают демонстрировать несколько иные свойства, чем в экспериментах. Зачастую, для нового материала (нового класса материалов) не удается найти подходящий критерий пластичности среди известных критериев и в результате создается новый критерий. В механике разрушения имеет место ситуация, аналогичная той, что сложилась в теории пластичности. Таким образом, литература по пластичности и теории разрушения – это очень большое количество публикаций, содержащих множество различных теорий и их модификаций. Однако в связи с созданием новых материалов, обладающих сложной внутренней структурой и уникальными свойствами, задача разработки новых подходов к исследованию пластического поведения и разрушения материалов не теряет актуальности.

Задачи, связанные с исследованием хрупкого разрушения и пластического течения, имеют огромное практическое значение. Поэтому целый ряд критериев пластичности и критериев разрушения содержится в пакетах программ, предназначенных для инженерных расчетов, в частности в пакете Abaqus, который использует автор диссертационной работы. Пакет Abaqus – это многофункциональный инструмент, который можно использовать как для чисто инженерных расчетов, так и для научных исследований. Этот пакет

предоставляет возможность не только выбирать содержащиеся в нем определяющие уравнения, критерии пластичности, разрушения и т.п., но и писать собственные подпрограммы со своими определяющими уравнениями и своими критериями пластичности и разрушения. Именно это и делает автор диссертации. В том случае, когда материал с подходящими свойствами содержится в пакете Abaqus, он использует стандартные функции пакета, когда подходящего материала нет, он пишет свои подпрограммы. Такой подход представляется вполне оправданным и очень современным. При современном уровне развития вычислительной техники и программного обеспечения аналитические решения представляют интерес, если они достаточно простые и наглядные, как например, те решения, которые представлены в диссертационной работе для случая жесткопластического материала, а программирование необходимо тогда, когда постановка задачи включает в себя уравнения, не содержащихся в стандартных пакетах.

Таким образом, диссертационная работа Б. Н. Федулова посвящена **актуальной тематике**, имеющей несомненное практическое **значение**, а используемые методы исследования представляются вполне обоснованными и отвечающими цели исследования. Приведенные в работе сравнения с экспериментальными данными убеждают в **достоверности полученных результатов**.

В качестве одного из главных достоинств диссертационной работы следует отметить то, что в ней моделируются конкретные технологические процессы. В работе рассматриваются определенные стадии технологии производства композиционных материалов на основе полимерных связующих, в частности, процесс кристаллизации. Рассматриваются также технологические процессы, связанные с созданием изделий из композитов, в частности, процесс формования.

Второе важное достоинство диссертационной работы заключается в том, что все введенные параметры состояния имеют ясный физический смысл. В результате, построенные модели сложных технологических процессов оказываются сравнительно простыми и интуитивно понятными моделями. При этом для всех предлагаемых моделей приведены конкретные значения параметров материалов и соответствующие зависимости, дающие возможность проводить практические расчеты.

Еще одно достоинство диссертационной работы состоит в том, что она содержит очень подробное и понятное описание всех рассмотренных задач. Сказанное относится как к задачам, решенным аналитически, так и к тем задачам, которые решались в пакете Abaqus с использованием написанных автором подпрограмм. Работа хорошо структурирована, содержит множество полезных иллюстраций и написана хорошим литературным языком. Она может быть опубликована в виде книги практически без дополнительного редактирования.

Новизна результатов, полученных в диссертации, заключается в следующем:

- Развит подход к анализу пластического деформирования сред, в которых при пластическом деформировании проявляется эффект дилатансии. Данный подход основан на использовании обобщенного критерия пластичности, содержащего параметр вида напряженного состояния. Продемонстрировано применение данного подхода для решения конкретных задач предельного состояния тел из материалов со сложной неоднородной структурой, в которых проявляется эффект дилатансии.
- Предложены расширения упомянутой выше модели пластического деформирования. А именно, предложена модель пластичности, учитывающая скоростное упрочнение и анизотропная модель

пластичности для металлических сплавов, полученных методом обработки давлением.

- Разработана методика оценки прочностных характеристик композиционного материала, основанная на моделировании укладки армирующих элементов и анализе истории температурного воздействия.
- Предложен ряд моделей нелинейно упругого поведения слоистого композита, характерной особенностью которых является различие жесткости материала в зависимости от типа нагрузки и эффектом снижения сдвиговой жесткости при увеличении сдвиговой деформации.
- Разработан подход к моделированию разрушения слоистого композита и на основе данного подхода построена теория, в которой в качестве входных параметров используются только стандартные инженерные характеристики материала.
- Проведено сравнение двух подходов к решению задачи о разрушении, один из которых основан на линейной модели упругости, а другой на модели упругости, учитывающей сдвиговую нелинейность и поврежденность материала. Показано, что области повреждения материала, предсказанные данными двумя подходами, отличаются друг от друга, тогда как интегральные предельные нагрузки практически совпадают.
- Предложена аналитическая формулировка для оценки влияния скорости накопления повреждений в материале на итоговую прочность.

Есть несколько замечаний, которые не ставят под сомнение полученные результаты и не влияют на общую положительную оценку работы:

1. В механике традиционно используются два подхода к описанию кинематики сплошных сред – материальное описание и пространственное описание. При моделировании упругих твердых

деформируемых тел используется материальное описание, при моделировании жидкостей – пространственное описание. Различие между материальным и пространственным описанием исчезает при переходе к линейной теории. В случае описания нелинейных уравнений это различие весьма существенно. При моделировании процессов разрушения и пластического течения по ряду причин в литературе используется как материальное, так и пространственное описание. К сожалению, в диссертации эти важные вопросы не обсуждаются.

2. На стр. 137 утверждается: «Таким образом, численные результаты демонстрируют независимость предельной нагрузки от величины угла выреза в рассматриваемом диапазоне.» Не лишним было пояснить с физической точки зрения, почему так происходит.
3. На стр. 163 говорится: «Рассмотрим еще один эксперимент разрушения образца с концентратором из сплава ВТ6(Ti-6Al-4V), как и ранее, при высоких скоростях.» Непонятно, кем проводился этот эксперимент и где он описан. Ссылка на литературу отсутствует.
4. На стр. 166 говорится: «В обоих случаях экспериментально полученные импульсы сильнее растянуты во времени, чем моделируемые, что по-видимому, связано с простотой построенных моделей, которые не учитывали сложные оснастки установки образцов, например, резьбовые соединения.» Следовало бы не ограничиваться предположениями, а проанализировать, какие свойства модели влияют на растянутость импульсов во времени. Разумеется, речь не идет о моделировании резьбовых соединений при расчетах в пакете Abaqus. Но ввести в модель вязкость и, поварьировав ее значения, посмотреть, как это влияет на растянутость импульсов, казалось бы, не очень трудно, и это можно было бы сделать.

5. На стр. 195 описывается методика моделирования в пакете Abaqus процесса формования термопластичного препрэга на основе стекловолокна и полипропиленового связующего. Не понятно, пришлось ли в данном случае автору работы написать свою подпрограмму или он воспользовался стандартными возможностями пакета Abaqus.
6. В списке литературы практически отсутствуют работы, опубликованные в XXI веке в российских журналах. Точнее говоря, кроме работ автора диссертации и его научного консультанта, в списке литературы есть только две работы из указанного временного диапазона, а именно «Победря Б. Е., Моделирование эволюционной деструкции композиционных материалов. 2009» и «Рычков Б. А., Паняев В. А., Гончарова И. В., Упругость и неупругость серого чугуна. 2012». Странно выглядит то, что автор диссертационной работы не упоминает достаточно близкие по тематике работы П. В. Трусова и его учеников – группы ученых, работающих в Пермском национальном исследовательском политехническом университете, т.е. в том учреждении, где частично выполнена диссертационная работа.

Общее заключение по диссертации.

Диссертацию Б. Н. Федулова можно квалифицировать как решение сложной и важной научной проблемы, имеющей теоретическое и прикладное значение и способствующей развитию теоретических подходов к анализу поведения под действием нагрузок материалов различной физической природы со сложными свойствами, определению значений предельных нагрузок для различных элементов конструкций. В ней сформулированы новые определяющие соотношения и получены новые аналитические и численные решения ряда задач, имеющие важное значение для развития теории упругости, теории пластичности и прочности, механики композитных

материалов и других областей механики деформируемого твердого тела. Работа выполнена на высоком научном уровне, лично автором, обладает внутренним единством и последовательной логикой изложения, имеет завешенный вид. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Б. Н. Федурова удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. Диссертант – Борис Никитович Федулов – заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент д. ф.-м. н., профессор
кафедры «Теоретическая механика»
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого

Е.А. Иванова



Подпись Е.А. Ивановой заверяю

Ф.И.О.

Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого

