

Отзыв

официального оппонента **А.Е. Романова** на диссертационную работу **Федурова Бориса Никитовича «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

Характеризуя диссертацию Б.Н. Федурова в целом, следует отметить, что данная работа посвящена теоретическому анализу деформирования сложных гетерогенных сред. В диссертации изучается механическое поведение широкого класса материалов и разнообразные эффекты, проявляющиеся при деформировании таких материалов. Рассматриваются как упругое деформирование, так и пластическое течение материала с последующим разрушением. В диссертации анализируются остаточные напряжения и влияние истории изготовления материала на его механические свойства. Большое вниманиеделено изучению механического поведения материала в зависимости от типа нагружения. Также можно подчеркнуть, что большая часть диссертационной работы (а именно, главы 3, 4 и 5) посвящена композиционным материалам.

Актуальность темы диссертации обусловлена во многом тем, что развитые в диссертации подходы применимы ко многим конструкционным материалам. В работе использован большой набор определяющих соотношений механики деформируемого твердого тела, часть из которых была предложена автором впервые. Все продемонстрированные наборы определяющих соотношений доведены до конкретных реализаций в виде численного моделирования. Такая степень проработки моделей, доведение методик до работы с конкретными прикладными задачами делает

диссертационную работу Б.Н. Федурова особенно актуальной для многих областей современной промышленности и инженерной практики.

Достоверность результатов, полученных в диссертации не вызывает сомнений. Это связано с использованием подходов на основе непротиворечивых утверждений механики сплошной среды и механики деформируемого твердого тела. Однако, главное, что подтверждает достоверность – это систематические сравнения результатов численных расчетов с экспериментальными данными и/или предсказаниями аналитических подходов. Например, в разделе, в котором анализируются эффекты дилатансии, аналитические решения сравниваются с результатами, полученными численно без привлечения большого количества предположений. В последующих разделах каждое утверждение является конкретным и проверяется непосредственно сравнением с соответствующим экспериментом.

Обсуждая теоретическую и практическую значимость полученных Б.Н. Федуловым результатов, а также их **новизну**, следует начать с того, что автором был проведён тщательный **обзор данных литературы** по теме диссертации, который показал разрозненность и непоследовательность используемых подходов для моделирования механического поведения материалов со сложной структурой. Используемые определяющие соотношения, как правило, являются сложными и не обладают логической связностью, что осложняет возможность работы с моделями на основе подобных соотношений.

Поэтому в качестве значимого результата работы, выкристаллизованного **во второй главе диссертации**, следует выделить план автора развивать универсальные теории и подходы. В статьях Б.Н. Федурова, по-видимому, впервые показано как, используя параметр вида напряженного состояния, связанный на интенсивность сдвиговых напряжений, и параметры поврежденности, можно формулировать и решать разнообразные задачи механики деформируемого твердого тела. В диссертации это показано четко и последовательно, т.е. от самых общих соображений до конкретных чисел с

анализом совпадения экспериментальных и теоретически полученных результатов.

Наиважнейший результат Б.Н. Федурова – это определяющие соотношения, предложенные впервые и позволяющие учесть большой класс эффектов, которые типичны для современных конструкционных материалов. Это, например, учет одновременного влияния типа нагрузки на пластические свойства материала и влияния скорости деформирования; рассмотрение анизотропии пластических свойств совместно с чувствительностью пределов текучести к виду нагружения; анализ нелинейных упругих моделей деформирования композитов; разработка модели разрушения композитов, учитывающей влияние скорости деформирования.

В третьей главе автор диссертации представил серьёзный анализ (с позиций механики деформируемого твёрдого тела) всех технологических стадий производства изделий на основе термопластичных композитов. Им был представлен набор известных механических моделей для термопластичного связующего и слоистых композитов для расчета остаточных напряжений в материале. Каждая отдельная модель была проверена сопоставлением с результатами экспериментов, а также была проведена окончательная верификация с использованием всех выбранных моделей на основе экспериментально определенного распределения остаточных напряжений после известного режима охлаждения образцов.

Далее Б.Н. Федулов предлагает решения для предсказания прочностных свойств материала, т.е. в наименее проработанной области исследования механического поведения термопластичных композитов. Автор диссертации предлагает подход, основанный на конкретных экспериментах, намерено избегая сложных схем испытания материала, что облегчает возможность применения предложенной методики на практике.

Развитый подход был реализован соискателем при решении нескольких задач: о трехточечном изгибе термопластичного материала, о трансверсальной прочности однонаправленного композита и о вытягивании волокна из

связующего. В каждой из упомянутых задач получены интересные научные результаты, позволяющие понять механику процессов, происходящих при деформировании композитов. Например, было показано, что в любом слоистом композите, с большим процентным содержанием армирующих волокон, при трансверсальном нагружении большая часть материала связующего находится в напряженном состоянии, практически соответствующем двухосному растяжению.

В четвёртой главе, посвященной нелинейной упругости, приведено доказательство того, что нелинейные сдвиговые свойства композита всегда могут быть приближены с любой степенью точности соотношениями, действующими в рамках упругости. Автору удалось подтвердить это положение, но используя модель, учитывающую влияние типа нагружения на жесткость материала, что расширяет возможности модели, предложенной в свое время Е.В. Ломакиным.

Последняя **пятая глава** диссертационной работы посвящена моделированию разрушения слоистых композитов. Предложен набор правил, позволяющий строить теорию разрушения, сложность которой определяется имеющимися данными. Каждое правило обозначает выбор тех или иных зависимостей для построения финальных определяющих соотношений. Например, показано, что линейная упругость может быть изменена на нелинейную если имеется достаточноное количество данных. Аналогичная ситуация имеет место для критерия начала разрушения, который также является элементом выбора. В качестве обоснованности высказанных предположений Б.Н. Федулов демонстрирует возможности подхода на основе простейших определяющих соотношений. Предложенные модели проверяются на экспериментах со сложным нагружением нетривиальных укладок армирующего наполнителя в композитном материале.

Как и всякое большое и комплексное исследование работа Б.Н. Федурова не лишена **недостатков**. Отмечу следующие из них:

(1) Материал в диссертации подан весьма сжато. Во многих случаях автор сразу без объяснений предлагает необходимые уравнения и проводит сравнения с экспериментом, не анализируя как исходные предположения, так и финальные результаты. Возможно, однако, что в более пространном изложении диссертация имела бы в несколько раз больше страниц, что не отвечает рекомендациям ВАК.

(2) В работе недостаточно внимания удалено физическому обоснованию выбора того или иного определяющего соотношения. Микроскопические механизмы деформирования в диссертации не обсуждаются.

(3) В тексте диссертации и автореферата встречаются опечатки, например, на странице 289 имеется явная опечатка в подписи к рисунку 5.3. Соискатель явно не дружит с причастными оборотами, так они остаются без запятых в подписях к рисункам 2.5 (стр. 77), 2.8 (стр.88), 2.17 (стр. 106, есть одна запятая). Интересно, что в подписи к рисунку 2.18 (стр. 108) уже все в порядке, т.е. присутствуют обе запятых!

(4) Библиография в диссертации оформлена не по ГОСТУ, в оформлении библиографии в автореферате нет никакой системы.

Следует отметить, однако, что высказанные замечания не влияют на высокую оценку рассматриваемой работы и ни в коем случае не опровергают результаты исследований Б.Н. Федурова, которые хорошо известны научной общественности. Это подтверждается полновесным списком работ по теме диссертации и многочисленными выступлениями с докладами на российских и международных конференциях и симпозиумах.

Подводя итог, можно **заключить**, что работа «Нелинейные эффекты деформирования в сложных неоднородных средах» является целостной, в диссертации дан большой ряд новых значимых для науки решений, и все они получены автором лично. Предложенные в диссертации методы обладают высокой степенью научной новизны в области механики деформируемого твердого тела и имеют важное практическое значение. Ряд рассмотренных в диссертации задач, несомненно, должен быть включен в физико-

математические и инженерные образовательные курсы в высших учебных заведениях как нашей страны, так и за рубежом.

Диссертационная работа отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Федулов Борис Никитович, без сомнения, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.



Романов Алексей Евгеньевич

Официальный оппонент

д. ф.-м. н., главный научный сотрудник

Сектора теории твердого тела

Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Физико-технический институт

им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук



194021, Санкт-Петербург,

Политехническая ул., 26, Россия

www.ioffe.ru

post@mail.ioffe.ru; aer@mail.ioffe.ru

8 (812) 297-2245; 8(812) 2927304

7 ноября 2017 г.