

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Федулова 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 твёрдого тела.

Диссертационная работа Б.Н. Федулова посвящена решению важной, фундаментальной научной проблемы. В ней развивается новое научное направление в механике твердого тела, связанное с усовершенствованным, перспективным классом определяющих уравнений, которые включают зависимости параметров упругости и пластичности материалов от вида напряженного состояния. В работе анализируется влияние различных форм нелинейности поведения материалов на характер напряженно-деформированного состояния с учетом накопления повреждений и разрушения материалов.

**Актуальность работы** определяется тем, что для ряда ответственных конструкций, например, авиационного и космического назначения традиционные представления о характере деформирования, определяемом набором констант материала, не обеспечивают достаточной точности расчетов и не позволяют описать ряд сложных явлений.

**Практическая значимость работы** связана с решением ряда реальных задач проектирования элементов конструкций из новых материалов. **Научная новизна** полученных результатов подтверждается тем, что многие задачи рассмотрены в изложенной постановке впервые. Автором предложена новая систематизация процесса прогнозирования свойств новых материалов на стадии их создания и применения при проектировании конструкций. **Достоверность** полученных результатов определяется корректным использованием строгих математических методов, а также сравнением результатов математического моделирования с большим объемом экспериментальных данных. **Научная значимость** работы обусловлена предложенными и обоснованными основными этапами методов проектирования новых композитных конструкционных материалов.

**Общая характеристика диссертационной работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов и обширного списка литературы. Во **введении** автор обосновал актуальность работы и достоверность результатов. Указаны новые подходы и методы, показано прикладное значение работы, отмечен личный вклад автора в получение результатов, выносимых на защиту. Сформулирована основная цель работы – создание нового класса определяющих соотношений и разработка методов моделирования деформирования и разрушения



новых материалов со сложной внутренней структурой. Автор исследует весь рабочий цикл материала: упругое деформирование, достижение предельных состояний и процесс разрушения. Означенные во **введении** основные цели исследования последовательно развиваются в пяти главах диссертации.

**В первой главе** приведен аналитический обзор работ по изучению свойств неоднородных материалов и моделям их описания. Рассматриваются материалы с внутренней структурой, различные типы композитов, содержащих волокна, частицы, включения, а также различные дефекты: трещины, поры. Одна из главных особенностей поведения таких материалов проявляется в упругой нелинейности и зависимости упругих свойств («модулей») от вида напряжённого состояния. Автором проведен подробный анализ возможностей использования предложенных моделей в практических расчетах. Основным выводом из проделанного обзора состоит в том, что на сегодняшний день в литературе отсутствует достаточно логичная и универсальная систематизация подходов. Ряд моделей включает большое число параметров, которые сложно определить устойчиво из ограниченного набора доступных экспериментов. Как и в других традиционных областях механики твердого тела, предпочтение следует отдавать наиболее простым моделям, которые, тем не менее, позволяют описывать основные особенности деформирования и разрушения материалов с существенно неоднородной структурой. Примером здесь могут служить простейшие линейные «законы» - Гука в упругости, Ома – в электротехнике, Кулона – в трении. Хотя их ограниченность и нестрогость очевидны, но львиная доля расчетов в истории цивилизации проводилась именно по этим линейным уравнениям. К подобной эффективной простоте и стремится автор диссертации, сохраняя в усложненных определяющих уравнениях лишь основные зависимости свойств от вида напряженного состояния.

**Вторую главу** можно считать центральной частью диссертации, и она посвящена моделированию пластического поведения дилатирующих сред. Вторая глава содержит основные научные идеи и показывает возможность их реализации. В главе 2 рассмотрено аналитическое моделирование предельного состояния материала с дефектами и приводится сравнение аналитических результатов с полученными автором оригинальными численными решениями, для которых были разработаны новые алгоритмы. Для ряда металлических сплавов предложены модификации модели пластичности. Основная сложность в описании поведения материалов со сложной внутренней структурой связана с отсутствием единой диаграммы деформирования в координатах «интенсивность напряжений - интенсивность деформаций». В отличие от классических моделей пластичности, в предлагаемых моделях учитываются необратимые изменения объёма. При этом диаграммы связи интенсивности деформаций с интенсивностью напряжений



существенно зависят от вида нагружения образца: одноосное растяжение, сжатие, сдвиг, двухосное сжатие и др.

Описанная выше особенность поведения характерна для широкого класса конструкционных материалов: композиты, графиты, чугуны, бетоны, полимеры, керамики и др.

Зависимости поведения материала от вида напряжённого состояния предложено описывать с помощью двух параметров: отношения среднего напряжения к интенсивности напряжений и угла подобия девиаторов тензора напряжений. Первый параметр характеризует отношение между вкладом в деформирование от нормальных и от касательных напряжений. Второй параметр сводится к параметру Лоде и определяет вид напряжённого состояния. За критерий пластичности принимается условие, предложенное в работах Е.В. Ломакина, где была показана возможность моделирования поведения широкого спектра дилатирующих материалов. Описание конкретного материала в данной модели определяется выбором функции от одного аргумента. Особенностью данной модели является возможность аналитического решения задач жёстко-пластического анализа предельных состояний с применением классического метода характеристик. В качестве иллюстрации рассмотрены решения нескольких практически важных задач оценки предельного состояния полосы, ослабленной краевыми трещинами, круговым отверстием, полукруглыми выточками. Далее описан примененный метод конечных элементов со встроенной автором моделью пластичности, основанной на ассоциированном законе течения. Проведено сравнение численных и аналитических результатов, и показано, что кинематические характеристики численного упругопластического решения несколько отличаются от результатов аналитического решения. Однако различия в значениях предельной нагрузки при численном решении составляют не более 4% процентов по сравнению с результатами, полученными аналитически.

Во второй главе предложена также модификация модели, позволяющая учесть влияние не только вида напряжённого состояния, но и скорости деформации. В качестве числового примера рассмотрено высокоскоростное деформирование образцов из титанового сплава и показано хорошее согласие расчётов с экспериментальными результатами для различных скоростей деформаций.

Автором предложена модель пластичности (модифицированный критерий Хилла в виде квадратичной формы от напряжений), учитывающая влияние вида напряжённого состояния и анизотропию пластических свойств материала. При обработке экспериментальных данных, полученных на образцах из алюминиевых сплавов, показана возможность качественного и количественного (с погрешностью порядка 1%) описания основных эффектов деформирования, которые не удавалось описать по традиционным моделям пластичности.



Основным результатом второй главы диссертации следует считать показанную возможность описания тонких эффектов деформирования для широкого класса материалов с применением разработанных моделей пластичности.

Последующие главы 3-5 демонстрируют возможности аналитического и компьютерного моделирования сложного деформирования и разрушения новых конструкционных материалов с учетом особенностей их изготовления и эксплуатации.

**В третьей главе** рассмотрена практически важная задача, связанная с обоснованием возможности анализа прочности композитных материалов в процессе их производства. На основе предложенных моделей пластичности рассмотрена методика количественной оценки остаточных напряжений, приводящих к возникновению дефектов в композитных изделиях. Эта методика применена к анализу слоистого композита с современной, высококачественной термопластичной матрицей (РЕЕК - полиэфирэфиркетон) и оценена прочность связующего и композита в целом. Микромеханическое моделирование основано на выделении ячеек периодичности, а для материала связующего использовали критерий пластичности, обоснованный во второй главе. С помощью численного моделирования определены константы критерия пластичности, и в результате удалось удовлетворительно описать эксперименты для различных видов напряжённого состояния. Проведено моделирование основных этапов технологии изготовления композитов, включающих формование изделия, кристаллизацию наполнителя, усадку связующего. Оценены эффективные свойства композита и уровень остаточных напряжений, что позволяет судить о возможности возникновения повреждений. Решена модельная задача о вытаскивании волокна из матрицы, что повышает вязкость разрушения композита. Показано, что в непосредственной близости к волокну пластические деформации изменяют вид напряжённого состояния, и это приводит к существенному упрочнению матрицы.

**В четвёртой главе** рассматривается композитная слоистая пластина в условиях эксплуатации, и при этом необходим только упругий анализ. Предложены новые методы описания нелинейно упругого поведения композитных материалов с учётом зависимости их свойств от вида нагружения и от направлений трёхмерного армирования волокнами. Основная нелинейность деформирования проявляется при сдвиге. Рассмотрено сжатие пластины из слоистого композита с круговым вырезом, и сравнение с экспериментами показало хорошую адекватность предложенного метода моделирования.

**Пятая глава** посвящена разработке модели разрушения слоистых композитов. Автор не ограничился теоретическими рассуждениями, а рассмотрел конкретный пример построения модели разрушения, основанной на стандартных экспериментальных данных, полученных при испытаниях слоистых композитов.



Сравнение теоретических и численных расчётов с экспериментальными данными показало возможность получить адекватную и достаточно универсальную теоретическую модель композита с одновременным учётом нелинейно упругого поведения материала и его зависимости от скорости деформаций.

**Наряду с общей положительной оценкой работы целесообразно отметить некоторые замечания и пожелания.**

**Замечания по диссертации:**

1 – Во второй главе автор рассматривает задачи о растяжении полос, ослабленных надрезами, с использованием различных методов – аналитического и численного на основе упругопластической модели деформирования. Результаты дают хорошее соответствие по значениям предельных нагрузок, но проявляется заметное различие в геометрических формах пластических областей. Интересно было бы в рамках численных моделей исследовать влияние глубины вырезов и снять сомнения по поводу возможного изменения формы пластических областей при более глубоких вырезах.

2 – В третьей главе автор приводит целый набор моделей для оценки остаточных напряжений. Предложенный итерационный подход позволяет достичь хорошего соответствия с результатами экспериментальных исследований, но такой подход применим только при монотонном снижении температуры без возможности учета повторного плавления кристаллов. Данный вопрос не обсуждается, но, видимо, это подразумевается, так как на практике подобная ситуация редко встречается. Имело бы смысл обсудить этот факт более четко.

3 – В последней, пятой главе демонстрируется интересный результат, связанный с нахождением параметров поврежденности на основе корней кубического уравнения. Автор не анализирует варианты корней этого уравнения. Для конкретных целей, поставленных в работе, это не оказалось необходимым, но анализ различных сочетаний корней представляет отдельный интерес. Скорее всего, различные комбинации корней имеют определенный физический смысл. Например, возможно, что равенство двух действительных положительных корней соответствует устойчивому разрушению, а наличие одного действительного корня определяет случай лавинообразного разрушения.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и являются скорее пожеланиями автору для дальнейших исследований.

В целом можно отметить, что работа выполнена на высоком научном уровне, хорошо оформлена, содержит принципиально новые научные положения и служит существенным развитием нового направления, связанного с описанием деформирования и разрушения материалов, свойства которых зависят от вида напряженного состояния. Автореферат отражает основные положения диссертационной работы, материалы диссертации достаточно полно освещены в



публикациях автора и прошли необходимую апробацию на конференциях и симпозиумах. Результаты диссертации опубликованы в международных рецензируемых журналах, индексируемых в системах Scopus или Web of Science, а также в отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК.

Диссертационная работа Федулова Б.Н. «Нелинейные эффекты деформирования в сложных неоднородных средах» представляет собой законченную научную работу, в которой автором разработаны теоретические модели и расчетные методы, имеющие большую фундаментальную и прикладную ценность.

Диссертационная работа Б.Н.Федулова соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней», и её автор - Федулов Борис Никитович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 Механика деформируемого твёрдого тела.

**Официальный оппонент,**

заведующий лабораторией безопасности и прочности композитных конструкций ФГБУН

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова

(ИМАШ РАН) д.т.н., профессор

А.Н. Полилов

*Подпись, должность и ученую степень Александра Николаевича Полилова заверяю*



*Александр - Ок Маш (сестра Бурыкина)*

Тел.: 8(499) 135-34-30 (служ.), 8 (905) 556-75-03 (моб.), [polilovan@mail.ru](mailto:polilovan@mail.ru)

Служ. адрес ИМАШ: 101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4,

тел.: 8(495) 628-87-30