

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ
Российской академии наук



125040, Москва, Ленинградский пр-т, д.7, стр.1
тел. (495)946-18-06, 946-18-02; факс: (495)946-18-03
e-mail: iam@iam.ras.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН ИПРИМ РАН, д.т.н.

Власов А.Н.

Власов А.Н.
октября 2017 г.

"30" октября 2017 г.
Исх. № 11505/202

Отзыв ведущей организации на диссертацию Федурова Бориса Никитовича на тему «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

В большинстве известных теоретических исследований нелинейного неупругого поведения деформируемых твердых тел предполагается, что процессы их формоизменения подчиняются частному постулату изотропии А.А. Ильюшина, т.е. не зависит от параметра вида напряженного состояния. Если для упругих сред учет их разномодульности достаточно часто обсуждается в имеющихся публикациях, то описанию свойства "разносопротивляемости" упруго - пластических или вязкоупругих тел уделяется гораздо меньше внимания. В то же время, в экспериментальных работах все чаще отмечается для различных материалов (горных пород, полимеров, композитов, сплавов с памятью формы и т.д.) наличие весьма существенных эффектов влияния вида напряженного состояния на процессы неупругого деформирования. Возникает настоятельная потребность учета и правильного теоретического описания этих эффектов в моделях поведения материалов, соответствующих системах определяющих соотношений и

решениях краевых задач механики деформируемого твердого тела. Если теоретические модели "разносопротивляемости" при нелинейном деформировании, хотя и редко, но встречаются в научной литературе, то с разработкой методов решения краевых задач для таких тел дело обстоит совсем плохо. Поэтому тематика данной диссертации, которая, как раз и направлена на теоретический анализ влияния вида напряженного состояния на эффекты нелинейного деформирования, с особым акцентом на решение конкретных краевых задач, без сомнения, является актуальной. Один из важнейших результатов, полученных в данной диссертации, сводится к тому, что предельные нагрузки для пластически деформируемого тела существенно убывают с увеличением степени влияния на поведение материала параметра жесткости напряженного состояния. Следовательно, без учета эффекта разносопротивляемости могут быть получены существенно завышенные значения предельных нагрузок. Проектирование, ориентированное на эти значения, может привести к катастрофическим результатам.

Помимо "разносопротивляемости" в рецензируемой диссертации теоретически моделируются ряд других относительно слабо изученных при нелинейном деформировании эффектов, таких как пластическая анизотропия, скоростная чувствительность, накопление повреждений и т.д. Учет этих явлений наряду и совместно с эффектом влияния вида напряженного состояния также является актуальной научной задачей.

Полученные в диссертации результаты обладают научной новизной. Так, впервые удалось распространить метод учета "разносопротивляемости", основанный на учете влияния на процесс деформирования величины параметра жесткости напряженного состояния на решение краевых задач теории пластичности (упруго - пластические определяющие соотношения). Впервые разработан аналитический аппарат жестко - пластического анализа (плоская деформация), учитывающий "разносопротивляемость", впервые получены точные аналитические решения целого ряда жестко - пластических задач, которые ранее с учетом влияния

вида напряженного состояния решены не были. Факт отрицательного влияния параметра жесткости напряженного состояния на предельные нагрузки установлен впервые (ранее было известно о снижении деформативности пластического материала с ростом этого параметра). Впервые исследован вопрос о близости значений предельных нагрузок, полученных в рамках жестко - пластического и упруго - пластического анализа для различных значений параметра жесткости напряженного состояния. Установлено, что разница между этими решениями не велика и не увеличивается с ростом параметра жесткости напряженного состояния. Абсолютной научной новизной обладает предложенный в диссертации метод учета нелинейного сопротивления композитов сдвигу путем введения в определяющие соотношения постоянного тензора сдвига D_{ij} .

Моделированию опыта по выдергиванию волокон из матрицы композита посвящено большое количество публикаций, однако в этих работах не учитывалось влияние вида напряженного состояния на рассматриваемый процесс. В данной диссертации впервые такой учет произведен и обнаружен любопытный эффект упрочнения, связанного с объемными эффектами, возникающими в связующем при сдвиге. Новизной обладает использованный в диссертации подход к анализу разрушения композитных конструкций, согласно которому критерий прочности зависит не только от значения параметра поврежденности, но и от скорости изменения этого параметра. В результате был получен неожиданный результат: оказалось, что таким образом можно моделировать скоростную чувствительность процесса деформирования (а не разрушения), причем результат моделирования диаграмм нагружения при различных скоростях неплохо соответствовал экспериментальным данным.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации решений сомнений не вызывает. Данное суждение основывается на том обстоятельстве, что для анализа используются классические многократно апробированные фундаментальные методы механики деформируемого

твердого тела. Правильность полученных аналитических решений проверяется непосредственно. Достоверность численных результатов подтверждается путем сравнения с аналитическими решениями. Наконец, полученные результаты теоретического анализа, там, где это возможно, сравнивались с экспериментальными данными других авторов. В частности, речь идет о полученном теоретически распределении остаточных напряжений в процессе отверждения связующего, о предельной нагрузке при трансверсальном нагружении однонаправленного композита со случайным распределением волокон по сечению, данных о растяжении композита на тканной основе под различными углами к направлению армирования, теоретических и экспериментальных данных по прочности стеклопластика при различных сочетаниях нормального и касательного напряжения. Блестяще совпали с экспериментальными данными результаты моделирования процесса нагружения полосы с отверстием, полученные с использованием нового, предложенного в диссертации метода учета сдвиговой нелинейности. Обнадеживают результаты сравнения с экспериментальными данными полученных теоретически диаграмм сдвигового нагружения композиционных материалов при различных скоростях нагружения.

Полученные в диссертации результаты имеют важное прикладное значение. Это, прежде всего, относится к разделам 3-5, непосредственно связанным с моделированием поведения композиционных материалов. Здесь рассмотрен ряд чрезвычайно важных в практическом отношении технологических задач, в частности, проблемы формования термопластичного препрега, моделирования процесса его отверждения с учетом процессов кристаллизации, усадки, а также возникающих остаточных напряжений, которые могут привести к разрушению готового изделия до начала эксплуатации. Предложены новые методы оценки прочности получаемого изделия. Важное прикладное значение имеет проведенное в разделе 3 в рамках модели, учитывающей "разносопротивляемость"

исследование вида напряженного состояния в образце, испытываемом на трехточечный изгиб в соответствии со стандартом ASTM. Оказалось, что на растянутой стороне образца напряженное состояние далеко от одноосного растяжения и обладает существенно большим значением параметра жесткости напряженного состояния. Эти данные заставят пересмотреть ранее принятую трактовку результатов таких испытаний. Необходимо отметить, что в диссертации речь идет о конкретных материалах, широко используемых в различных областях промышленности (сплавы ВТ6, АД33, связующее ПЭЭК, конкретные композиты).

Все перечисленные выше результаты получены лично автором диссертационной работы. Это касается всех аналитических и численных решений задач механики деформируемого твердого тела, приведенных в диссертации, результатов идентификации использованных для этого решения моделей, формулировке выводов из этих решений.

По теме диссертации соискателем опубликована 41 печатная работа, среди которых 15 статей в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, большая часть которых индексируется в международных базах цитирования Scopus и Web of Science. Данные публикации, также как и автореферат диссертации, достаточно полно отражают основные положения и результаты, полученные в работе.

Считаем целесообразным продолжить проведенные в данной диссертации исследования по следующим направлениям.

а. Интересно было бы учесть влияние на поведение материала не только параметра жесткости напряженного состояния, но и второго независимого параметра вида напряженного состояния, в качестве которого можно взять отношение третьего инварианта тензора напряжений к кубу его интенсивности. Выражение для этого параметра приведено в диссертации на стр. 54, однако при решении конкретных задач он не используется. Для некоторых классов деформируемых твердых тел (например, сплавов с памятью формы) зависимость от этого параметра имеет решающее значение.

Рекомендуется в дальнейшей работе включить в модель второй параметр вида напряженного состояния.

б. Рекомендуется в дальнейшей работе развить модель пластического деформирования разносопротивляющихся материалов на случай теории с комбинированным (изотропным и трансляционным) упрочнением.

в. Рекомендуется в дальнейшей работе учесть в моделях кристаллизации связующего эффекты выделения и поглощения латентного тепла фазового перехода и диссипативные явления.

Замечания по тексту диссертации

1. На стр. 54 имеется фраза "В общем случае, для изотропного материала необходимо анализировать ... между тремя главными напряжениями". Пропущено, по-видимому, слово "связь".

2. На стр. 230 (нижняя строка) написано: "Образец моделировался объемными солидными элементами" ... Здесь использована, по-видимому транслитерация на кириллицу слова "Solid", причем термин имеет значение "трехмерный", а не "солидный".

3. Термином "поврежденность" со времени пионерских публикаций Ю.Н. Работнова обозначается величина, которая отражает ухудшение прочностных свойств материала в процессе его нагружения (деформирования) и растет в процессе ухудшения этих свойств. В работе Л.М. Качанова введено альтернативное понятие, которое можно идентифицировать как "сплошность". Эта величина уменьшается в процессе накопления повреждений. В данной работе параметр называется "поврежденность", однако он, в процессе накопления повреждений не растет, а убывает, как "сплошность". Данное обстоятельство может затруднить понимание текста диссертации читателем, привыкшим к общепринятой терминологии.

Сделанные замечания являются терминологическими, касаются стилистики изложения результатов в диссертации и не отражаются на общем положительном отношении к работе.

Заключение

Рассматриваемая диссертация является самостоятельной, завершенной работой, посвященной решению крупной фундаментальной научной проблемы, имеющей важное прикладное значение. Разработанные в диссертации методы обладают высокой степенью научной новизны, достоверность полученных результатов сомнений не вызывает. Тематика диссертации соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела». Таким образом, работа отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико - математических наук, а ее автор, Федулов Борис Никитович, заслуживает присуждения ему этой ученой степени.

Доклад Федурова Б.Н. по диссертационной работе заслушан на расширенном заседании ученого совета института прикладной механики РАН 26 октября 2017 г. Диссертация обсуждена и одобрена (протокол № 08/17 от 26.10.2017 г.)

Адрес Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт прикладной механики Российской академии наук": 125040, Москва, Ленинградский пр-т, д.7, стр.1.
тел. (495)946-18-06, 946-18-02;
факс: (495)946-18-03.
e-mail: iam@iam.ras.ru.
Сайт института: <http://iam.ras.ru>

Отзыв составил

Профessor, д.ф.-м.н, г.н.с.

ФГБУН ИПРИМ РАН



Мовчан А.А.

Подпись г.н.с. Мовчана А.А.

удостоверяю

Ученый секретарь

ФГБУН ИПРИМ РАН



Карнет Ю.Н.