

Отзыв официального оппонента на диссертацию
Клементьева Петра Дмитриевича
«Двухуровневый анализ некоторых типов композитов и метаматериалов»,
представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

В последние годы наблюдается неуклонный рост интереса к дисперсно-упрочненным композитам, пористым и искусственно созданным (мета-) материалам, обладающим уникальными физико-механическими характеристиками. Проектирование подобных материалов и конструкций из них на основе чисто эмпирического подхода представляется чрезвычайно ресурсоемким (как с точки зрения материальных, так и временных затрат). В современных условиях решение подобных проблем немыслимо без использования методов и подходов, основанных на математическом моделировании, включающем постановку и решение краевых задач механики деформируемого твердого тела. Важнейшим компонентом таких моделей являются определяющие соотношения (конститутивные модели), отражающие физико-механические свойства материалов. Поскольку последние практически полностью определяются структурой материалов, в настоящее время для описания их поведения наиболее перспективным представляется использование многоуровневых моделей. В связи с вышесказанным тема, выбранная соискателем для исследования, является весьма **актуальной**.

О **научной новизне** диссертационной работы свидетельствует разработанная в рамках многоуровневого подхода новая модель для описания поведения композитов (алюминиевая матрица с керамическими включениями, резинокорд) и метаматериалов с различной периодической структурой, а также

полученные с помощью разработанной модели объяснение ряда механических эффектов поведения рассматриваемых материалов.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной модели (включая алгоритмы и программу ее реализации) для проектирования изделий из рассматриваемых материалов.

Достоверность результатов работы подтверждается удовлетворительным соответствием данных, полученных с применением созданной автором модели, с результатами, полученными другими методами, в том числе – экспериментальными.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на множестве семинаров, Международных и Всероссийских конференциях, представлены в 14 публикациях автора (в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук).

Автореферат соответствует и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы (187 источников), изложена на 147 страницах. Во введении обосновывается актуальность, научная новизна и достоверность результатов работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, краткие сведения о содержании диссертации, апробации и публикациях соискателя по теме работы.

В первом параграфе первой главы рассматривается базовое понятие представительного объема для построения определяющих соотношений различных материалов, в том числе – композитов с периодическим и непериодическим строением структуры. Приведен краткий обзор работ, содержащих описание методов и анализ результатов их применения для определения эффективных характеристик различных материалов со сложной структурой на

мезоуровне; особое внимание уделено композиту на основе алюминиевой матрицы, армированной частицами карбида бора. Отмечается, что широко применяемая в классической теории пластичности гипотеза единой кривой не выполняется для широкого класса материалов, включая пористые среды, композиты, горные породы. В связи с этим возникает необходимость учета в определяющих соотношениях истории деформирования, не сводимой к интенсивности накопленной пластической деформации. Второй параграф посвящен описанию широко используемого для определения упругих характеристик композитов асимптотического метода осреднения. Приведена расчетная схема, используемая в работе для определения компонент тензора упругих характеристик. Представлены результаты экспериментального исследования структуры и модулей упругости композита (алюминиевый сплав, армированный частицами карбида бора, B4C/2024Al), осуществлено определение представительного объема, приведены результаты расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в двух- и трехмерной постановках. В третьем параграфе приведены результаты расчетов концентрации напряжений, определенные по интенсивностям напряжений. Четвертый параграф посвящен рассмотрению результатов моделирования деформирования представительного объема пористого материала; основное внимание уделено определению осредненных напряжений и деформаций. В пятом и шестом параграфах приведены результаты исследования упругопластического деформирования (при последовательности нагружения объемным сжатием и простым сдвигом и в обратном порядке) пористого материала и композита с различными формами пор и включений. Показано, что для пористого материала с неканоническими («угловатыми») порами зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций существенно зависит от последовательности нагружений, для эллипсоидальных пор расхождение значитель-

но меньше. Для композита результаты расчетов практически не зависят от характера нагружения независимо от формы включений. В восьмом параграфе приведены результаты применения прямой модели для определения параметров определяющего соотношения Друкера – Прагера для описания поведения пористого материала с неканоническими порами.

Вторая глава посвящена исследованию процессов деформирования композитов и пористых материалов с учетом поврежденности. В первом параграфе приведен краткий обзор работ по данной тематике. Во втором параграфе рассмотрены три варианта алгоритмов расчета поврежденности материала, приведены критерии разрушения матрицы и включений. В третьем параграфе приведены результаты решения тестовых задач в плоской постановке для квадратной области с различно расположенными вырезами круговой формы; исследуется сеточная сходимость и вычислительная эффективность описанных в предыдущем параграфе алгоритмов. Четвертый параграф содержит результаты экспериментов и расчетов диаграммы одноосного растяжения образцов из композита (B4C/2024Al). В расчетах использованы реальная (полученная томографией) и искусственно сгенерированная (с включениями в форме эллипсоидов) структуры. Результаты расчетов, полученные на образцах с реальной структурой, демонстрируют удовлетворительное соответствие экспериментальным данным.

В главе 3 рассматриваются мета- и резинокордовые материалы; первый параграф содержит описание структур и краткий обзор работ, в которых приведены методы и результаты исследования указанных классов материалов. Во втором параграфе рассмотрен вывод на основе асимптотического метода разрешающих соотношений для анализа деформирования тонкостенных пластин из материалов с внутренней структурой, определяющей связность различных мод деформации (растяжения/сжатия и изгиба). В третьем параграфе

приведены результаты расчета связности растяжение – изгиб при цилиндрическом изгибе резиновой пластины, армированной гофрированными металлическими включениями эллиптической и сферической форм. Четвертый параграф содержит результаты численного определения размеров резинокордовых образцов и эффективных модулей упругости при различной укладке корда; приведены также данные экспериментальных исследований. Пятый параграф посвящен выводу соотношений асимптотического метода (до второго приближения включительно), ориентированного на анализ поведения метаматериала (трехмерная постановка). В шестом параграфе рассмотрены соотношения для асимптотического метода первого порядка, ориентированного на анализ связности растяжения/сжатия с кручением для квазипериодического метаматериала. В седьмом параграфе рассмотрены результаты исследования поведения образцов из искусственных метаматериалов с периодической и квазипериодической структурами, образованными стержнями различных форм и размеров.

В Заключение приведены основные результаты диссертационной работы.

Замечания и вопросы по работе.

1. Глава 1, параграф 1.1. Понятие представительного объема (ПО) является ключевым при построении определяющих соотношений (ОС) (или конститутивных моделей (КМ)). При использовании многоуровневого подхода это понятие должно быть определено для каждого структурно-масштабного уровня. При необходимости исследования «тонких» эффектов, связанных с влиянием границ образцов или изделий (например, для изделий микронных размеров) необходимо вводить разные понятия ПО для объема и приграничных областей.

2. Параграф 1.2. По существу, задача определения компонент тензора упругих характеристик сводится к вычислению матрицы системы линейных алгебраических уравнений по известным векторам решения и правой части. Известно, что в общем виде решение такой задачи не существует. С точки зрения механики задание только одной ненулевой компоненты тензора деформации при равенстве всех остальных нулю для материалов со сложной структурой не всегда возможно. Возможно решение данной задачи в частных случаях, но для этого требуется априорное установление симметричных свойств исследуемого материала.
3. Параграф 1.3. Каковы характерные размеры конечных элементов? Какие свойства задавались для мелких элементов? При размерах элементов, соизмеримых или меньших характерных размеров зерен, для элементов необходимо использовать тензоры упругих характеристик кристаллитов (с кубической решеткой – для алюминиевого сплава, и тригональной – для кристаллов карбида бора).
4. Параграф 1.4. Следует отметить, что теория пластического течения обеспечивает приемлемую точность расчетов только при деформировании по траекториям малой кривизны. В связи с этим необходимо прежде всего проверить, каков характер нагружения для составляющих композит фаз. Не исключен вариант, что для фаз нагружение будет сложным даже при простом (лучевом) нагружении образцов композита в целом. Кроме того, гипотеза единой кривой даже для однофазного материала в точности не выполняется (в том числе – для простых нагружений).

5. Глава 2, параграф 2.2. Следует обосновать выбор критерия разрушения для каждой из составляющих композит фаз; обычно критерии разрушения для хрупких и вязких материалов отличаются.
6. Параграф 2.3. Не понятен выбор материала для экспериментального исследования. Насколько картон пригоден для описания деформирования и разрушения рассматриваемых в работе материалов (композитов, пористых сред)?
7. Глава 3, параграф 3.1. Термин «конечные деформации», несмотря на его частое применение, едва ли может быть признан корректным. Малые деформации тоже конечны. При этом правильнее оперировать понятием градиентов перемещений. Например, собственно деформации могут быть малы (как это часто бывает, например, при анализе мягких оболочек), но градиенты перемещений при этом могут быть большими, в силу чего появятся большие повороты. В этом случае задачи (даже физически-линейной теории упругости) следует рассматривать как геометрически нелинейные.

Заключение по диссертации.

Диссертационная работа П.Д.Клементьева «Двухуровневый анализ некоторых типов композитов и метаматериалов» представляет завершённую научно-квалификационную работу, вносит значительный вклад в решение крупной научной проблемы механики деформируемого твёрдого тела в части разработки подходов к описанию процессов деформирования материалов со сложной внутренней структурой (композитов и метаматериалов).

Приведённые замечания не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.8 – Механика деформи-

руемого твердого тела (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университетом имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Клементьев Петр Дмитриевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

Доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования систем и процессов факультета прикладной математики и механики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Заслуженный деятель науки РФ,

/ П.В. Трусов /
25.05.2026

Контактные данные: Трусов Петр Валентинович,

тел.: +7(342)2391297, e-mail: tpv@pstu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.02.04 (1.1.8) – Механика деформируемого твердого тела.

Адрес места работы:

614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики, кафедра математического моделирования систем и процессов.

Сл.т. (342)2391297, электронная почта tpv@pstu.ru

Подпись сотрудника Пермского национального политехнического университета
П.В.Трусова удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ПНИПУ

В.И. Макарович