

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертацию ВАГАНОВОЙ Ирины Константиновны  
«Моделирование динамического разрушения керамических  
композиционных материалов на основе многоуровневого подхода»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук  
по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твёрдого тела.**

Диссертация И.К. Вагановой посвящена развитию одного из перспективных подходов моделирования механических свойств новых композиционных материалов на керамической основе - многоуровневому моделированию деформируемых твердых тел с учетом структуры материалов на мезоскопическом уровне. В качестве объекта исследования выбран класс тугоплавких электропроводных композиционных материалов и нанокомпозитов, имеющий важное прикладное значение для авиакосмической отрасли, ядерной энергетики и ряда других отраслей.

Тема диссертации И.К. Вагановой, несомненно, является актуальной. При проектировании и создании элементов конструкций в современных и перспективных энергетических установках, транспорте, авиакосмической техники остро востребованы адекватные модели и методы для описания механического поведения новых теплостойких и тугоплавких композиционных керамических композитов и нанокомпозитов. Экспериментальные исследования свойств керамических композиционных материалов на основе оксидов, карбидов и боридов металлов, особенно, в условиях приближенных к эксплуатационным условиям, в том числе при динамических воздействиях, дорогостоящи и трудоемки. Одним из перспективных направлений для прогнозирования механического поведения керамических композитов является многоуровневое моделирование, которое развивается в представленной диссертационной работе.

Диссертация включает введение, три главы и заключение, а также содержит список литературы из 122 работ.

В первом разделе диссертации представлен детальный обзор результатов исследований влияния структуры перспективных классов тугоплавких керамических композитов на основе оксидов, карбидов и боридов металлов на их механические свойства в квазистатических и динамических условиях. Обосновано применение многоуровневого подхода для моделирования механических свойств керамических нанокомпозитов в условиях динамических воздействий.

Приведены результаты оригинальных исследований структуры опытных образцов отечественных тугоплавких нанокompозитов.

Проведен анализ методов многоуровневого динамического моделирования механического поведения керамических композитов и нанокompозитов при квазистатических и динамических нагрузках, обоснована целесообразность развития многоуровневых моделей для прогнозирования механических свойств керамических нанокompозитов.

**Во втором разделе** обсуждаются вопросы построения двухуровневой физико-математической модели механического отклика керамических композитов на динамическое воздействие, рассматривается алгоритм определения модельного представительного объема композита.

Представлен алгоритм реализации модели при решении динамических задач с применением метода сглаженных частиц. Приведены результаты тестовых расчетов с применением метода сглаженных частиц.

**В третьем разделе** представлены результаты моделирования динамического разрушения рассматриваемых композитов и нанокompозитов на основе многоуровневого подхода. Представлены численные исследования влияния концентраций упрочняющих частиц в композитах и нанокompозитах.

Приведены результаты численных исследований влияния структуры рассмотренных классов нанокompозитов на величину динамической трещиностойкости при интенсивных динамических воздействиях.

Основные **научные результаты** диссертационной работы заключаются:

- в создании методик построения представительных объемов керамических композитов, моделирования динамического разрушения объемных керамических композитов и нанокompозитов;
- в создании алгоритмов метода сглаженных частиц для моделирования деформации и разрушения композитов и нанокompозитов на мезоскопическом уровне при динамических нагрузках;
- в создании физико - математической модели деформации и разрушения объемных керамических композитов и нанокompозитов на основе  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и  $ZrB_2$  при интенсивных динамических воздействиях с амплитудами до 20 ГПа;
- в установлении закономерностей развития повреждений и разрушения, объемных наноструктурных керамических композиционных материалов  $ZrB_2 - B_4C$ ,  $ZrB_2 - t ZrO_2$ ,  $ZrB_2 - Al_2O_3$  при концентрации упрочняющих частиц до 30 % по объему при интенсивных динамических воздействиях;

- в получении новых теоретических данных о пределах упругости Гюгонио прочности перспективных нанокompозитов  $ZrB_2 - B_4C$ ,  $ZrB_2 - t ZrO_2$ ,  $ZrB_2 - Al_2O_3$  в диапазоне изменения концентрации упрочняющих частиц до 30 об. %;
- в установлении квазихрупкого характера разрушения нанокompозитов  $ZrB_2 - B_4C$ ,  $ZrB_2 - t ZrO_2$  при воздействии ударных импульсов с амплитудами, превышающими макроскопический предел упругости, разрушаются;
- в получении новых теоретических данных о динамической трещиностойкости нанокompозитов в широком диапазоне скоростей деформации.

Исследования, проведенные И.К. Вагановой являются оригинальными, а указанные результаты являются новыми.

Материалы диссертации свидетельствуют о том, что И.К. Вагановой решена задача, имеющая важное значение для исследований в области мезомеханики многоуровневых сред со структурой, механики композиционных материалов и конструкций, теории накопления повреждений, механика разрушения твердых тел и критерии прочности при сложных режимах нагружения, разработки математических моделей и численных методов анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования. Это соответствует пунктам 3, 4, 6 и 8 паспорта специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Как следует из представленных в диссертации материалов, исследования И.К. Вагановой проводились в рамках проекта РФФИ 12-01-00805 «Развитие реологических моделей для математического моделирования процессов деформирования и разрушения хрупких гетерогенных материалов, находящихся в стесненных условиях, с учетом зависимости механического отклика от скорости нагружения», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (Соглашение № 14.В37.21.0441) Минобрнауки РФ, научно-исследовательских работ в рамках государственного задания ТГУ №2014.223 (код проекта 1943).

Полученные в диссертационной работе И.К. Вагановой результаты позволили расширить возможности многоуровневого моделирования для описания процессов деформации и разрушения керамических композиционных материалов, включая нанокompозиты, в условиях интенсивных динамических воздействий. Разработанная модель, алгоритм ее численной реализации могут быть использованы при решении как прикладных, так и научных поисковых задач, связанных с динамическими воздействиями на элементы конструкции из субмикрористаллических керамических композиционных материалов.

Полученные данные о прочностных свойствах опытных образцов перспективных тугоплавких нанокompозитов на основе  $ZrB_2$  могут быть использованы при разработке элементов конструкций авиакосмической техники и энергетического оборудования.

Это свидетельствует о несомненной научной и практической значимости полученных в диссертации И.К. Вагановой результатов.

Вместе с тем, по диссертации И.К. Вагановой следует сделать ряд замечаний:

1. В диссертации приведен достаточно подробный обзор предшествующих теоретических и экспериментальных исследований других авторов. Следовало прямым образом сопоставить результаты, полученные с применением предложенной модели и моделями других авторов.
2. При формулировке физико-математической модели деформирования и повреждения композитов на мезоскопическом уровне использованы соотношения, предлагавшиеся другими авторами для иных условий нагружения и иных классов материалов. Поэтому, следовало более подробно изложить указать границы применимости предлагаемой модели по классам керамических композитов и нанокompозитов, масштабным уровням и по диапазонам условий воздействий.

Сформулированные замечания, носят рекомендательный характер и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы И.К. Вагановой.

Материалы диссертации хорошо опубликованы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в ведущих рецензируемых научных журналах, включая 4 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Текст диссертации и автореферата написаны в научном стиле, достаточно хорошо иллюстрированы.

На основании анализа диссертации и автореферата можно сделать следующее заключение:

Диссертация Ирины Константиновны Вагановой является законченной научной квалификационной работой, в которой развит подход многоуровневого моделирования в 3D постановке для исследования закономерностей разрушения керамических композитов и нанокompозитов на мезоскопическом уровне при динамическом нагружении, имеющие важное значение для развития мезомеханики многоуровневых сред со структурой, механика композиционных материалов, разработки математических моделей и численных

методов анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования.

Считаю, что диссертация "Моделирование динамического разрушения керамических композиционных материалов на основе многоуровневого подхода" полностью соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям (Пункт 9), а ее автор, Ваганова Ирина Константиновна, заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент  
заведующий лабораторией  
механики наноструктур  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт механики Уральского Отделения  
Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
426067, г. Ижевск,  
ул. Т. Барамзиной, 34, к. 102,  
тел. +7(3412) 214583, +79124668029  
e-mail: [vakhrushev-a@vandex.ru](mailto:vakhrushev-a@vandex.ru),  
[postmaster@ntm.udm.ru](mailto:postmaster@ntm.udm.ru),  
<http://www.udman.ru/>

Вахрушев Александр Васильевич



"10" 12 2014 г.

Я, Вахрушев Александр Васильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Вагановой Ирины Константиновны, и их дальнейшей обработкой.

Подпись А.В.Вахрушева заверяю  
Ученый секретарь  
к.ф.-м.н.



А.В. Северюхин