



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»  
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

Россия, Санкт-Петербург, 190005, 1-я Красноармейская ул., д.1. Тел.: (812) 316-2394, факс: (812) 316-2409,  
e-mail: komdep@bstu.spb.su, www.voenmeh.ru  
ИНН 7809003047

оr 15.09.2014 № 3/д72

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю

диссертационного совета Д 002.075.01  
при ФГБУН «ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК», (ИПМаш РАН)  
Индейцеву Д.А.

199178 г.Санкт-Петербург, В.О.,  
Большой проспект, д.61



/ Иванов К.М./  
2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Балтийский  
государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова»  
на диссертационную работу Левандовского Андрея Николаевича на тему  
«Модели термомеханического поведения пористых керамических структур»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

1. Актуальность темы

Актуальность работы продиктована острой экологической  
необходимостью снижения концентрации канцерогенных веществ в выпускных  
трактах выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания машин путем

использования фильтров. Такие фильтры изготавливаются из материалов, важнейшими характеристиками структур которых, являются высокая пористость, устойчивость к неравномерным высокотемпературным воздействиям, включая внешние механические, низкое гидравлическое сопротивление.

Решению именно этой задачи посвящена работа Левандовского А.Н. основанная на моделировании температурно-механического поведения пористых керамических структур. Подобный подход актуален, так как позволяет предсказывать эффективность получаемых термомеханических свойств пористых структур. Это обусловлено тем, что механические свойства поликристаллических материалов, применяющихся для производства фильтров, недостаточно изучены, материалы существуют только в пористом виде, часто содержат температурные микротрешины (из-за ортотропии КТР кристаллов) и поры, что затрудняет экспериментальные исследования их эффективных свойств на микроуровне. Поэтому большинство работ посвященных исследованию термомеханических свойств пористых структур основано на аналитических моделях. Приведенный же подход, основанный на сочетании компьютерного моделирования комбинаций аналитических и эмпирических обобщений, выглядит весьма привлекательным.

Однозначно, актуальность темы подтверждается также тем, что её выполнение спонсировалось коммерческой организацией в рамках проектов по созданию сажевых фильтров нового поколения.

**2. Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработанных и примененных методах моделирования линейных упругих и температурных эффективных свойств, разрушения, температурного микрорастескивания одно- и многофазных пористых структур на сетках одинаковых КЭ кубической формы, что обосновывается данными объемного томографического сканирования.

Впервые для оценки достаточности разрешения томограмм использованы диаграммы послойной плотности, позволяющие оценить качество оцифровки без применения МКЭ.

Уточнены коэффициенты связей микро- и макроскопических величин в эксперименте нейтронной дифракции, связи эффективного модуля упругости и эффективного коэффициента теплопроводности пористых структур и структур с микротрешинами.

Предложена и применена зависимость критерия удаления КЭ от размера КЭ для того, чтобы избежать зависимости результатов моделирования разрушения от размера КЭ.

Впервые предложен и использован метод прямого вычисления объёмной плотности микротрешин.

### **3. Достоверность и обоснованность исследования**

Достоверность обоснована строгостью математических выкладок, корректностью применяемых численных моделей, незначительным отличием полученных результатов моделирования с аналитическими расчетными и экспериментальными данными, как оригинальных, так и известных, открытых публикаций.

Высокая воспроизводимость численных результатов, полученных на образцах одних и тех же материалов, исключает случайный фактор.

Использованы современные методики сбора, обработки исходной информации, результатов испытаний и компьютерного моделирования.

**4. Практическая значимость** состоит в том, что предлагаемые модели могут быть использованы при оценке перспективности использования в различных инженерных приложениях тех или иных пористых структур материалов, а так же их эффективных свойств.

Результаты исследования, в том числе построенные КЭ модели используются в коммерческой организации Корнинг для ускорения работы по поиску составов и процессов изготовления пористых керамических структур, оптимальных для изготовления фильтров выхлопных газов.

## **5. Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, пяти основных разделов, заключения, списка литературы из 127 наименований и приложений. Основной текст изложен на 221 листах

**Во введении** сформулированы цели и задачи исследования, обоснована актуальность решаемых задач; описана научная новизна, приведено краткое содержание диссертационной работы.

**В первом разделе** выполнен обзор и анализ литературных источников, близких по теме исследований данной работы.

**В втором разделе** приведено общее описание исследуемых материалов и образцов, а также описаны численные и экспериментальные методы, имеющие отношение к рассматриваемым в диссертации задачам.

**В третьем разделе** описано механическое моделирование образцов без учета температурного микрорастягивания.

Решен ряд линейных задач для определения эффективного модуля упругости  $E^{eff}$ .

Приведены результаты расчетов, обосновывающие выбор в данном исследовании критерия первой главной деформации в качестве критерия удаления конечного элемента. С использованием выбранного критерия  $\epsilon^1$  промоделировано разрушение при растяжении и сжатии нескольких образцов на разных сетках с постепенно уменьшающимся линейным размером элемента. Показано, что значение критерия  $\epsilon^*$  удаления конечного элемента зависит от размера элемента  $r$  следующим образом:

$$\varepsilon^* \sim \frac{1}{r^\lambda},$$

где  $\lambda$  – показатель сингулярности, соответствующий геометрии структуры в непосредственной окрестности удаляемого КЭ, может принимать значения в диапазоне от 0,455 до 0,500.

Обоснован выбор величины показателя  $\lambda = 0,5$ .

Проведено исследование сеточной сходимости для линейных задач об определении эффективного модуля  $E^{eff}$ .

Предложен быстрый (не требующий КЭ расчетов) метод оценки качества оцифровки пористых структур по диаграммам послойной плотности. Сделан вывод о достаточности разрешения томограмм, используемых для КЭ моделирования: размер voxеля (элемента томограммы) должен быть меньше медианного размера пор, формирующих материал основных частиц или включений. То же верно и для размера КЭ.

Для интерпретации экспериментов нейтронной дифракции в дополнение к известным формулам, предложенным М. Качановым, связывающим осредненные микроскопические величины, выведены новые практически важные соотношения, показывающие, что отношение компонент тензора деформаций зависит от морфологии пор  $m$ , а отношение осредненных по всему объему пористого образца микродеформаций в осевом и трансверсальном направлении, равняется коэффициенту Пуассона материала скелета, взятому с обратным знаком.

Результаты моделирования данного раздела позволили сформулировать основные выводы, относящиеся к материалам без микротрецин.

**В четвертом разделе** приведено описание и обоснование применяемых в работе подходов к моделированию температурного микрорастескивания, приведены результаты моделирования материалов с микротрецинами и выполнено сравнение с экспериментальными данными.

Разработан метод определения предельного значения для критерия разрушения  $T^*$  (или  $\varepsilon^*$ ) для выбранного КЭ двумя способами:

- по данным о пороговом значении размера домена, при котором температурные микротрешины отсутствуют;
- по результатам сравнения модельных и экспериментальных кривых  $E(T)$ .

На основании результатов моделирования материалов с микротрешинами сформулированы следующие выводы.

- 1) Форма модельных кривых  $E^{eff}(T)$  совпадает с экспериментальной, наблюдаются полностью аналогичные тенденции при изменении свойств и размеров доменов.
- 2) Модельные кривые  $E^{eff}(T)$ , полученные с использованием структур кубических доменов полностью, совпадают с кривыми, полученными на доменах другой формы (вороновских ячейках), как по форме кривых, так и по абсолютным значениям модуля упругости во всем диапазоне температур.
- 3) Структуры доменов и микротрешин изотропны (по результатам сравнения данных КЭ анализа эффективной прочности и упругости образцов без микротрешин и образцов разной степени микрорастескивания).
- 4) Структура доменов кубической формы представительна при количестве доменов большем, чем  $8^3$ .
- 5) Описанный подход позволяет моделировать трехфазные материалы с микротрешинами (промоделировано влияние свойств различных фаз на процесс разрушения трехфазной структуры на основе титаната алюминия).
- 6) Впервые предложен прямой метод вычисления индекса микрорастескивания.

В пятом разделе рассматривается связь эффективного модуля упругости и эффективного коэффициента теплопроводности однофазного пористого

материала. На основании обработки результатов более чем шестисот численных экспериментов уточнены коэффициенты эмпирической зависимости

$$\ln\left(\frac{k^{eff}}{k^{mat}}\right) = C \cdot \ln\left(\frac{E^{eff}}{E^{mat}}\right).$$

Показано, что  $C = 0,70$  для изотропного скелета и  $C = 0,58$  для доменной структуры ортотропного скелета пористой структуры.

Проведено сравнение полученных коэффициентов с данными, найденными в открытых источниках.

Подтверждено существование связи между изменением эффективного упругого модуля и эффективного коэффициента теплопроводности пористой структуры.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы исследования.

#### **6. Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе**

Автором опубликованы 7 статей, в том числе три – в зарубежных журналах из перечня Scopus, одна – в зарубежном журнале из перечня Chemical Abstracts и две – в российских журналах из перечня ВАК.

Содержание автореферата соответствует предъявляемым требованиям и достаточно полно отражает основные положения диссертации.

Работа написана грамотно, существенных замечаний по оформлению диссертации нет. Содержание автореферата в полной мере соответствует содержанию диссертации.

#### **7. В качестве замечаний по работе можно указать следующее:**

- 1) При рассмотрении тестовой задачи о кубе со сферическим вырезом не учитывается изменение пористости при рассмотрении сеток КЭ кубической формы (для сетки, целиком покрывающей границу полости,

эффективная пористость должна быть меньше, чем для сетки, не пересекающейся с границей полости).

- 2) Не приведены экспериментальные свидетельства того, что температурные микротрешины могут залечиваться (а не просто закрываться) при повышенной температуре.

## 8. Заключение

Диссертационная работа Левандовского А.Н. является законченной научно-квалификационной работой, соответствует требованиям п. 9 ВАК «Положения о присуждении ученых степеней». Результаты проведенных автором научных изысканий можно характеризовать как теоретически и экспериментально обоснованные разработки, представляющие большой интерес для специалистов в указанной области.

Приведенные замечания не носят принципиальный характер, не влияют на основные выводы и не снижают общего благоприятного впечатления от работы.

Результаты опубликованы, в том числе в ведущих мировых высокорейтинговых журналах, доложены на нескольких международных конференциях.

Новые научные результаты, полученные диссидентом, имеют существенное значение для разделов механики деформируемого твердого тела, связанных с экспериментальным, теоретическим и численным исследованием упругого деформирования и хрупкого разрушения пористых микроструктур. Выводы и рекомендации, сделанные в работе, являются обоснованными.

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова считает, что диссертация полностью удовлетворяет существующим требованиям Положений ВАК, предъявляемых к кандидатским диссертациям, и соответствует критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Левандовский Андрей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени

кандидата технических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв составлен доктором технических наук Санниковым Владимиром Антоновичем, профессором, заведующим кафедрой механики деформируемого твердого тела ФГБОУ ВО «Балтийский Государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Диссертация и автореферат рассматривались на заседании кафедры механики деформируемого твердого тела 14.09.2017г. Отзыв заслушан и одобрен. Протокол заседания №2 от 14.09.2017 г.

Зав. кафедрой «Механика деформируемого твердого тела», д.т.н., профессор Санников В.А. В.А. Санников В.А.

Ученый секретарь кафедры,  
к.т.н., доцент Буткарева Н.Г. Н.Г. Буткарева