



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИФПМ СО РАН
Е.А. Колубаев
2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук

Диссертация Зиминой Валентины Алексеевны «Определение механических характеристик хрупких пористых материалов на основе численного моделирования», представляемая на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, выполнена в лаборатории нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем (ЛНММиМС) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИФПМ СО РАН) и на кафедре прочности и проектирования физико-технического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ФГАОУ ВО НИ ТГУ).

В 2016 г. Зимина Валентина Алексеевна (дата рождения 24.02.1993 г.) окончила с отличием магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по направлению 15.04.03 Прикладная механика.

В период подготовки диссертации соискатель ученой степени Зимина В.А. обучалась в очной аспирантуре ФГАОУ ВО НИ ТГУ с 01.09.2016 по 31.08.2020 г. по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика и работала в лаборатории нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем ИФПМ СО РАН в должности младшего научного сотрудника с 30.12.2018 по настоящее время.

В 2020 г. Зимина В.А. окончила аспирантуру ФГАОУ ВО НИ ТГУ по направлению подготовки 01.06.01 – Математика и механика, специальность

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Диплом об окончании аспирантуры выдан НИ ТГУ 10 июля 2020 г., № 107031 0054832.

Научный руководитель – Смолин Игорь Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем ИФПМ СО РАН (основное место работы), профессор кафедры прочности и проектирования ФГАОУ ВО НИ ТГУ (работа по совместительству).

По итогам обсуждения диссертационной работы Зиминой В.А. принято следующее

Заключение

Актуальность темы диссертации

Разработка методов прогнозирования механических характеристик хрупких пористых материалов и их механического поведения в условиях разного рода воздействий представляет собой актуальную научно-исследовательскую задачу. В настоящее время хрупкие пористые материалы, в частности, керамики широко применяются в различных областях промышленности. Известно, что эффективные механические свойства этих материалов определяются их поровой структурой (общей долей пор, формой, размерами, расположением).

За последние десятилетия был проведен ряд исследований, направленных на установление связи между эффективными механическими характеристиками и значением пористости материалов. Несмотря на обширный объем исследований, посвященных влиянию поровой структуры на эффективные механические свойства, в большинстве из них рассмотрены лишь упрощенные представления о форме пор и структуре порового пространства. Попытки учесть более сложную структуру материала с порами разной морфологии, размеров и находящихся на разных расстояниях друг от друга имеющимися аналитическими или численно-аналитическими методами превращаются в сложную задачу, которая в настоящее время не имеет решения. В связи с этим в диссертационном исследовании Зиминой В.А. был предложен метод расчета эффективных механических характеристик изотропных хрупких пористых материалов на основе экспериментальных данных об их поровой структуре и численных исследований их механического поведения.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Зиминой В.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена задача разработки и апробации метода определения эффективных механических характеристик хрупких пористых

материалов со сложноорганизованной структурой имеющая значение для развития механики деформируемого твердого тела.

Основные результаты, полученные соискателем впервые

1. Разработан новый вариант определяющих соотношений повреждаемых сред для описания особенностей разрушения упруго-хрупких материалов в зависимости от вида напряженного состояния.

2. Предложен новый метод расчета эффективных механических характеристик изотропных хрупких пористых материалов на основе экспериментальных данных об их поровой структуре и моделирования механического отклика мезообъемов для случая плоского деформированного состояния в условиях одноосного растяжения и сжатия и продемонстрирована его работоспособность на примере пористой корундовой керамики.

3. Установлено, что при увеличении температуры спекания корундовой керамики в диапазоне 1400-1600°C ее пористость линейно падает с 33 % до 17 %, а модуль Юнга и предел прочности при изгибе нелинейно возрастают.

4. Установлены закономерности изменения напряженного состояния в мезообъемах пористой корундовой керамики при механическом нагружении.

5. Рассчитаны эффективные упругие модули и прочностные характеристики корундовой керамики с пористостью в диапазоне 17–33 %, которые согласуются с экспериментальными данными с точностью до 8 %.

Теоретическая значимость работы

Разработанная модель упруго-хрупкой-повреждаемой среды имеет фундаментальное значение, поскольку позволяет учитывать особенности неупругого деформирования и разрушения материалов чувствительных к виду напряженного состояния. Результаты численного моделирования механического поведения пористых керамик вносят вклад в развитие существующих представлений о влиянии поровой структуры на процессы деформации и разрушения и в других изотропных хрупких пористых материалах.

Практическая значимость работы

Предложенный Зиминой В.А. метод расчета эффективных характеристик хрупких пористых материалов имеет перспективу применения для пористых материалов разной природы, может быть использован при разработке новых материалов с заданными свойствами, а также в инженерных расчетах изделий из таких материалов. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты, касающиеся особенностей

напряженно-деформированного состояния и влияния поровой структуры на эффективные свойства пористых корундовых керамик, могут использоваться в специальных курсах по механике деформируемого твердого тела и вычислительной механике при подготовке магистрантов по направлению 15.04.03 Прикладная механика в Томском государственном университете и других университетах.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных Зиминой В.А. результатов обеспечивается применением современных экспериментальных методов исследований на сертифицированном оборудовании, математической корректностью постановки задачи, использованием апробированных численных методов, выполнением тестовых расчетов для верификации моделей и компьютерной программы, согласованностью полученных численных результатов с результатами экспериментальных исследований, а также с результатами, опубликованными другими авторами в научной литературе по данной тематике.

Личный вклад

Личный вклад автора заключается в самостоятельной проработке литературы по теме исследования, модификации расчетной программы, построении компьютерных моделей мезообъемов образцов, проведении численных расчётов, обработке и анализе численных и экспериментальных результатов, в написании научных статей по теме диссертации и представлении докладов на научных конференциях. Соискателем совместно с научным руководителем поставлены цель и задачи исследования, а также сформулированы основные выводы и положения, выносимые на защиту.

Основное содержание работы изложено в 8 публикациях, из которых 2 статьи в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, и 6 статей в журналах, индексируемых в базах научного цитирования Web of Science и Scopus.

Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. **Микушина, В. А.** Численное моделирование деформирования и разрушения пористой алюмооксидной керамики на мезоуровне / В. А. Микушина, И. Ю. Смолин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – №. 58. – С. 99–108.

2. **Зиминая, В. А.** Экспериментальное исследование структуры, упругих и прочностных характеристик пористой корундовой керамики / В. А. Зиминая

// Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2020. – №. 67. – С. 117–126.

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

1. Eremin, M. Investigation of failure mechanism of Al₂O₃ specimens subjected to three-point bending test / M. Eremin, A. Kulkov, I. Smolin, **V. Mikushina** // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2019. – Vol. 13, №. 50. – P. 38–45.
2. **Mikushina, V. A.** Experimental and numerical investigation of mechanical behavior of porous ceramic materials in three-point bending / V. A. Mikushina [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2051. – P. 020192-1–020192-4.
3. Kulkov, A. S. Investigation of mechanical response of Al₂O₃ ceramic specimens to loading with consideration for their structural features / A. S. Kulkov, I. Yu. Smolin, **V. A. Mikushina** // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2051. – P. 020162-1–020162-4.
4. **Mikushina, V. A.** Simulation of mesoscopic fracture of ceramics with hierarchical porosity / V. A. Mikushina, I. Yu. Smolin // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2053. – P. 030041-4–030041-4.
5. **Mikushina, V. A.** Investigation of mechanical properties of porous alumina ceramics: experiment and simulation / V. A. Mikushina, I. Yu. Smolin, A. S. Kulkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 613, Article 012026. – P. 1–4.
6. **Mikushina, V. A.** Numerical analysis of the stress state and fracture of porous ceramics at the mesolevel / V. A. Mikushina, I. Yu. Smolin // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2019. – Vol. 1214. – P. 012016-1–012016-8.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих научных международных и всероссийских мероприятиях: Международная научная молодежная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (г. Томск, Россия, 2017 г., 2018 г.), Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения» (г. Томск, Россия, 2018 г.), Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (г. Томск, Россия, 2018 г., 2020 г.), Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (г. Томск, Россия, 2017 г.), Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, Россия, 2018 г.), International Conference on Competitive Materials and Technology Processes

(Мишкольц-Лиллафюред, Венгрия, 2018 г.), Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, Крым, 2019 г.), International Conference on Rheology and Modeling of Materials (Мишкольц-Лиллафюред, Венгрия, 2019 г.), International scientific workshop «Functional ceramic composite materials» (Мишкольц, Венгрия, 2019 г.), Международная конференция по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (г. Алушта, Крым, 2020 г.).

Научная специальность диссертации

Анализ структуры и содержания диссертационной работы Зиминной В.А. «Определение механических характеристик хрупких пористых материалов на основе численного моделирования» показал, что по содержанию и полноте изложенного материала работа соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, физико-математические науки (паспорт специальности, п. 2, 3, 7, 8) и всем требованиям п. II Положения о присуждении ученых степеней.

Заключение принято на заседании экспертного научного семинара ИФПМ СО РАН по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела». Присутствовало на заседании 39 человек, в том числе 13 докторов и 10 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 39 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, № 65 от 19.05.2021 г.

Председатель семинара:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией физики прочности
ИФПМ СО РАН



Зуев Лев Борисович

Секретарь семинара:

доктор физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
лаборатории физики прочности
ИФПМ СО РАН



Баранникова Светлана Александровна