

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной
деятельности Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор

Ворожцов Александр Борисович

«24» декабря 2020 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
по диссертационной работе Зиминой Валентины Алексеевны
«Определение механических характеристик хрупких пористых
материалов на основе численного моделирования»

Диссертация «**Определение механических характеристик хрупких пористых материалов на основе численного моделирования**» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела выполнена на кафедре прочности и проектирования физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и в лаборатории нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

В 2016 году **Зиминая Валентина Алексеевна** (дата рождения 24 февраля 1993 г.) окончила магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по направлению 15.04.03 Прикладная механика.

В 2020 году Зиминая В.А. окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по направлению 01.06.01 Математика и механика.

Сведения о сдаче кандидатских экзаменов приведены в приложении к диплому об окончании аспирантуры.

Научный руководитель: Смолин Игорь Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прочности и проектирования физико-технического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Зиминной В.А. представляет собой законченную научную работу, в которой содержатся результаты решения научной задачи определения эффективных механических характеристик хрупких пористых материалов со сложноорганизованной структурой, имеющей значение для развития механики деформируемого твердого тела.

Актуальность темы диссертации

Актуальность тематики исследования связана с широким применением хрупких пористых материалов во многих сферах деятельности. С точки зрения механики деформируемого твердого тела, особую значимость представляют исследования влияния особенностей поровой структуры этих материалов на их эффективные механические свойства, а также процессы их деформирования и разрушения.

Диссертация Зиминной В.А. посвящена одной из важнейших задач механики деформируемых пористых сред – разработке метода прогнозирования механических характеристик хрупких пористых материалов и исследованию их механического поведения в квазистатических условиях нагружения. В случае пористых материалов такой прогноз необходимо производить с учетом особенностей их поровой структуры, поскольку она оказывает существенное влияние на модули упругости и предел прочности таких материалов. Несмотря на то, что изучению проблемы влияния пористости на механические характеристики, в первую очередь упругие модули, посвящено значительное количество научных работ, в них предлагаются упрощенные представления о форме пор и структуре порового пространства. В связи с этим в работе предложен метод расчета эффективных механических характеристик изотропных хрупких пористых материалов на основе экспериментально-численного исследования. Данный метод позволяет наиболее полно учесть микроструктуру пористых материалов при оценке их эффективных механических свойств и прогнозе их механического поведения.

Утверждение темы диссертации, назначение научного руководителя

Тема утверждена решением учёного совета Физико-технического факультета Томского государственного университета от 24 ноября 2016 г., протокол № 2; изменена решением учёного совета физико-технического факультета Томского государственного университета от 25.09.2020 г., протокол № 29.

Научным руководителем назначен доктор физико-математических наук, доцент Смолин Игорь Юрьевич (приказ по Томскому государственному университету от 07 октября 2016 г., протокол № 4566/с).

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Цель и задачи исследования, а также выводы и положения, выносимые на защиту, сформулированы соискателем совместно с научным руководителем. Самостоятельно

выполнена модификация расчетной программы, разработан метод определения эффективных механических характеристик хрупких пористых материалов, обработаны результаты проведенных экспериментов, составлены компьютерные модели мезообъемов образцов, выполнены численные расчёты и анализ полученных результатов, написаны статьи по теме диссертации.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, применением сертифицированного экспериментального оборудования, использованием апробированных экспериментальных методик и программного комплекса, выполнением тестирования вновь предложенных моделей и методик, непротиворечивостью расчетных и экспериментальных результатов диссертации, а также их с согласием с данными, полученными другими авторами.

Новизна результатов проведенного исследования

В диссертации предложена новая модель, описывающая поведение упругих хрупких повреждаемых материалов, отличающаяся тем, что известный ранее закон накопления повреждений оказывает влияние на деградацию не предела прочности, а упругих модулей. Разработан новый метод расчета эффективных механических характеристик изотропных хрупких пористых материалов на основе экспериментальных данных об их поровой структуре и моделирования механического отклика мезообъемов пористых материалов в условиях одноосного сжатия и растяжения для случая плоского деформированного состояния с последующей обработкой диаграмм деформирования для разных параметров напряженного и деформированного состояния.

Установлены закономерности изменения напряженного состояния в мезообъемах пористой корундовой керамики при механическом нагружении. Обнаружено, что в случае одноосного растяжения мезообъемов пористой корундовой керамики в них присутствуют как растягивающие, так и сжимающие локальные напряжения, максимальный разброс между которыми достигает в десятки раз превышает эффективный предел прочности при растяжении.

Показано, что при линейном росте температуры спекания корундовой керамики в диапазоне от 1400 °С до 1600 °С линейно уменьшается пористость спеченных образцов с 33 % до 17 % и нелинейно увеличиваются модуль Юнга и предел прочности при изгибе.

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

Теоретическая и практическая значимость диссертации и использование полученных результатов

Теоретическую значимость имеет разработанная модель упруго-хрупкой повреждаемой среды, 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.

Предложенный метод расчета эффективных характеристик хрупких пористых материалов имеет важное практическое значение с точки зрения перспективы применения для разных пористых материалов и использования при разработке новых материалов с заданными свойствами, а также в инженерных расчетах изделий из таких материалов. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы научные результаты (особенности напряженно-деформированного состояния и влияние 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 вузах.

Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

По теме диссертации Зимина В.А. опубликовала 8 работ, из которых 2 статьи в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, и 6 статей в изданиях, индексируемых в базах научного цитирования Web of Science и Scopus. Общий объем публикаций – 3,02 а.л., личный вклад автора – 1,51 а.л. В опубликованных работах достаточно полно изложены основные научные результаты диссертации.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки):

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 – 0,55 / 0,27 а.л.

2. **Зимина, В. А.** Экспериментальное исследование структуры, упругих и прочностных характеристик пористой корундовой керамики / В. А. Зимина // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2020. – №. 67. – С. 117–126. – 0,55 / 0,54 а.л.

Статьи 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. – 0,48 / 0,12 а.л.

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. – 0,24 / 0,06 а.л.

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. – 0,24 / 0,08 а.л.

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. – 0,24 / 0,12 а.л.

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. – 0,24 / 0,08 а.л.

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. – 0,48 / 0,24 а.л.

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на ряде научных международных и всероссийских конференций, среди которых:

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.).

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Содержание диссертации соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки) по областям исследования «Мезомеханика многоуровневых сред со структурой» (п.3 паспорта специальности), «Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники» (п.7 паспорта специальности), «Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования» (п.8 паспорта специальности).

Диссертация «Определение механических характеристик хрупких пористых

материалов на основе численного моделирования» Зиминной Валентины Алексеевны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела, физико-математические науки.

Заключение принято на объединённом заседании кафедр прочности и проектирования и механики деформируемого твёрдого тела физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Присутствовало на заседании 16 человек, в том числе 10 докторов и 6 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 46 от 16 декабря 2020 г.

Кульков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прочности и проектирования физико-технического факультета



Председатель

Каракулов Валерий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прочности и проектирования физико-технического факультета



Секретарь