

Отзыв на автореферат

Диссертации Калягина Максима Юрьевича на тему «Динамическое поведение пористых материалов под действием высокоинтенсивных нагрузок различной физической природы», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Актуальность и общая характеристика работы:

Актуальность работы определяется необходимостью адекватного прогнозирования динамического поведения и прочностных свойств пористых материалов, широко применяемых в качестве конструкционных материалов в авиационной и аэрокосмической промышленности. Подобные материалы широко применяются благодаря демпфирующим, шумо- и теплозащитным свойствам, а также они активно применяются в качестве облегченных заполнителей в трехслойных конструкциях. Несмотря на широкое применение, теоретическое изучение подобных материалов не в полной мере изучено. При высокоинтенсивных нагрузках различной физической природы (динамических, вибрационных, импульсных и волновых воздействиях) классические модели сплошной среды не позволяют описать специфические микроструктурные эффекты. В частности, мало изученными остаются градиентные масштабные эффекты и влияние неинтегрируемой (свободной) дилатации в условиях интенсивной динамики, чему посвящена данная работа.

Общая характеристика работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, методология, личный вклад автора и положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе сформулирована и исследована линейная изотропная обобщенная вариационная модель дефектно-пористой градиентной среды. В выражение плотности потенциальной энергии деформации введено новое билинейное слагаемое относительно градиентов совместного и несовместного изменения объемов, что отличает модель от теорий Тупина и Миндлина. В работе было доказано, что классическая теория упругости, теории Тупина, Миндлина и среда с алгебраической пористостью являются частными случаями построенной модели. В качестве прикладных задач рассмотрены точные постановки цилиндрического изгиба пористых пластин.

Во **второй** главе представлены методология и результаты экспериментальных исследований перспективных трехслойных авиационных конструкций с пористым заполнителем. Объектом испытаний послужили образцы вспененного полиметакрилимида (акримида) с разной пористостью. С использованием растровой электронной и оптической микроскопии определена морфология пор. Проведены квазистатические испытания на

трехточечный изгиб с последующей КЭ-валидацией в Ansys Workbench. На вибростенде проведены динамические испытания на заданные вынужденные колебания и виброудар.

В **третьей** главе подробно описан пошаговый алгоритм построения вариационной модели на основе подхода Ковина с введением скалярного параметра пористости. Получены разрешающие уравнения Эйлера и полная система граничных условий для задач растяжения и чистого изгиба пористых стержней. С использованием предвнесенного дифференциального потенциала в операторной форме получено общее решение краевой задачи. Что позволило устранить классические жесткостные эффекты теории сверхтонких стержней.

В **четвертой** главе проведена идентификация неклассических параметров модели. Пористый материал представлен в виде трехфазного гетерогенного композита со «пустыми» сферическими включениями. Получены явные аналитические оценки для эффективных модулей объемного сжатия в зависимости от концентрации пустот. В среде MATLAB проведено расчетно-параметрическое исследование влияния масштабных характеристик. Установлено, что параметр связи деформации и пористости вызывает наибольшее отклонение от классического решения из-за возникновения дополнительных микроструктурных напряжений.

В **пятой** главе разработана математическая модель высокоинтенсивного косоугольного и нормального ударного взаимодействия неоднородного пористого ударника с жестко заземленной стальной преградой. Поведение преграды описано моделью вязкопластического тела Шведова-Бингама в рамках теории деформаций Генки-Ильюшина. Сформулировано разрешающее нелинейное уравнение движения, численно реализованное методом сеток в неявном виде. Выведена замкнутая инженерная формула для определения минимальной скорости пробития панели. Результаты верифицированы КЭ-моделированием в Ansys / LS-DYNA с использованием критерия разрушения Джонсона-Кука.

Новые результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Сформулирована и исследована обобщенная вариационная модель градиентной дефектно-пористой среды, учитывающая совместное (стесненное) и несовместное (свободное) изменение объема пор посредством введения дополнительного билинейного слагаемого в плотность потенциальной энергии. Впервые определена структура тензоров инерционных составляющих, содержащая четыре новые динамические константы межфазного взаимодействия матрицы и пор.

2. Разработана математическая модель, численный алгоритм (реализованный методом сеток в неявном виде) и инженерная методика проекторочного расчета процесса

высокоинтенсивного соударения гетерогенного пористого тела с деформируемой преградой. Метод базируется на теории конечных пластических деформаций Генки-Ильюшина и модели вязкопластического тела Шведова-Бингама. Получена явная расчетная формула для определения минимальной скорости пробития металлической панели эквивалентным пористым ударником.

3. Впервые проведен комплексный цикл натурных испытаний физико-механических свойств образцов из современного пористого полимера - вспененного полиметакрилимиды (акримида) различной плотности. Детально исследовано поведение пористых материалов в условиях статического и динамического нагружения.

Практическая ценность диссертации

Практическая ценность диссертационной работы носит ярко выраженный прикладной характер и заключается в создании расчетно-экспериментальных методов для внедрения перспективных пористых материалов в высокотехнологичные отрасли промышленности. Разработанные аналитические модели позволят существенно упростить процесс оценки напряжённо деформированных материалов пористых материалов, работающих в условиях динамического нагружения.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного поверенного оборудования с лицензионным программным обеспечением, а также применением современных методов экспериментальных исследований и математического моделирования.

Соответствие автореферата диссертации

Автореферат и опубликованные по теме диссертации работы полностью отражают содержание диссертации. Соответствие автореферата диссертации Калягина М.Ю. подтверждается точным отражением ключевых элементов и результатов, изложенных в самой диссертационной работе.

Замечания

1. Из текста автореферата не вполне ясно, какие именно физические микроструктурные механизмы (например, скопление пор) обуславливают необходимость введения этого коэффициента и почему им пренебрегали в классических теориях Тупина и Миндлина.

2. Во Второй главе указано, что экспериментальные исследования в статике и динамике проводились на малоразмерных образцах акримида с габаритами. Учитывая, что средний диаметр пор составляет порядка 0,1 мм, не оказывали ли масштабные и

приповерхностные эффекты на границах образца существенного искажающего влияния на модули упругости, полученные в ходе трехточечного изгиба.

3. Для идентификации параметров пористый материал аппроксимируется моделью трех фаз как композит с «пустыми» сферическими включениями. При этом показано, что для сохранения погрешности расчета модуля сдвига в пределах 5–10% концентрация пор ϕ не должна превышать 2.33–4.67%. Однако достаточно часто пористые материалы авиационного назначения обладают значительно большей объемной пористостью. Насколько правомерно использовать данные оценки механики композитов для сильнопористых сред?

Заключение

Сделанные замечания носят рекомендательный характер, могут послужить основой для дальнейшего развития работы и не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы.

Диссертация «Динамическое поведение пористых материалов под действием высокоинтенсивных нагрузок различной физической природы» Калягина М.Ю. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ и заявленной научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Калягин Максим Юрьевич является квалифицированным специалистом в области математического моделирования с использованием программ компьютерной алгебры и программных комплексов конечно-элементного моделирования, а также в области экспериментальных исследований при проведении статических и динамических испытаний и заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Заместитель директора по научной работе

Филиала ФГБУН Института машиноведения

им. А.А.Благонравова РАН «Научного центра
нелинейной волновой механики и технологии РАН»

д.т.н., проф., член-корр. РАН



Украинский Л.Е.

11.06.2026

Контактные данные организации: филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН».

Адрес: 119334, Россия, г. Москва, ул. Бардина, д.4.

E-mail: sekretar@imash.ru, тел.: 8 499 135-61-05