

Отзыв научного руководителя
доктора физико-математических наук, профессора
Шешенина Сергея Владимировича

на диссертационную работу Клементьева Петра Дмитриевича на тему «Двухуровневый анализ некоторых типов композитов и метаматериалов», представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

В диссертационной работе Клементьева Петра Дмитриевича «Двухуровневый анализ некоторых типов композитов и метаматериалов» применены вычислительные эксперименты на мезоуровне для определения свойств дисперсных композитов, пористых материалов и метаматериалов на макроуровне. В работе исследованы теоретически особенности определения эффективных свойств композитных и пористых материалов, проведены вычисления эффективных свойств на уровне структуры материала, выполнено сравнение с экспериментальными данными. Для метаматериалов теоретически и численно исследовано сохранение свойств связанности растяжение/изгиб, сжатие/кручение при масштабировании структуры.

Диссертация состоит из вступления, трех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе метод асимптотический осреднения применен для определения эффективных упругих модулей дисперсных композитов. На примере композита $B_4C/2024Al$ выполнено сравнение результатов расчетов для реальной и модельных структур с экспериментальными данными. Исследовано влияние формы включений на концентрацию напряжений. Для модельных пористых и композитных материалов изучено влияние сложного пути деформирования, сочетающего объемное сжатие и сдвиг, на вид осредненной диаграммы. На основе вычислений на уровне структуры с пористым материалом с угловатыми пораами идентифицированы параметры макромодели Друкера–Прагера.

Во второй главе проведен сравнительный анализ вариантов алгоритма прогрессирующего разрушения на мезоуровне: с деградацией в точке интегрирования, в конечном элементе и в области фиксированного размера. На модельных задачах установлены свойства рассматриваемых вариантов: сеточная сходимость, зависимость результатов от вариации параметров метода, зависимость от величины шага нагружения. Выполнено сравнение с результатами экспериментов, показано качественное соответствие областей разрушения.

Алгоритм применен к расчету диаграмм деформирования композита $B_4C/2024Al$ с искусственной и реальной структурой. Показано, что учет реальной геометрии включений и механизмов повреждения фаз материала является существенным фактором приближения расчетных кривых к экспериментальным данным.

В третьей главе метод асимптотического осреднения во втором приближении применён для теоретического исследования связанности растяжение/изгиб, сжатие/кручение в метаматериалах с хиральной структурой. В результате применения метода осреднения показано и численно подтверждено для сред с периодическими в декартовой системе координат структурами коэффициенты связанности обратно пропорциональны числу ячеек. Для метаматериалов с периодической структурой в цилиндрической системе координат показана независимость связанности растяжения с кручением от размера структуры. Численным моделированием определены зоны краевого эффекта в резинокордных образцах и обоснована методика испытаний коротких образцов.

Основные результаты диссертации изложены в 14 работах, из них 3 статьи опубликованы в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI. Научные результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: Международный научный симпозиум по проблемам механики деформируемых тел, посвящённый 115-летию со дня рождения А.А. Ильюшина (Москва, 2026); Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, ИПРИМ РАН (Москва, 2019, 2021, 2023, 2025); Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках», ПНИПУ (Пермь, 2023, 2024); Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, МАИ (Алушта, 2021, 2025); Международная научная конференция «Ломоносов» (Москва, 2020–2024); Международная конференция по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, МАИ (Алушта, 2022); Международная научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва, 2020–2022); Международная молодёжная научная конференция «XLVII Гагаринские чтения» (Москва, 2021); Международная конференция «Математическое моделирование», МАИ (Москва, 2020).

Кроме того, полученные результаты докладывались и обсуждались на научно-исследовательских семинарах: на семинаре кафедры теории пластичности механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством д.ф.-м.н., проф., члена-корр. РАН Е.В. Ломакина (2026 г.); на

семинаре кафедры механики композитов механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством д.ф.-м.н., проф. М.У. Никабадзе (2026 г.); на семинаре имени А.А. Ильюшина кафедры теории упругости механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством д.ф.-м.н., член-корр. РАН Д.В. Георгиевского (2026 г.); на объединенном заседании семинара лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций и лаборатории механики новых материалов и технологий под руководством д.ф.-м.н., члена-корр. РАН Д.С. Лисовенко, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва (2026 г.); на секции Ученого совета НИИ механики МГУ под руководством д.ф.-м.н., проф. Д.В. Тарлаковского (2026 г.); на межкафедральном научно-исследовательском семинаре по вычислительной механике под руководством д.ф.-м.н., проф. С.В. Шешенина, к.ф.-м.н., к.г.-м.н. Н.Б. Артамоновой и к.ф.-м.н. Ф.Б. Киселева (2021–2026 г.).

П.Д. Клементьев проявил себя способным, трудолюбивым исследователем. Результаты, полученные П.Д. Клементьевым, представляются интересными, являются новыми, обоснованными и проиллюстрированы компьютерным моделированием.

Представленная работа «Двухуровневый анализ некоторых типов композитов и метаматериалов» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Рекомендую присудить ее автору П.Д. Клементьеву ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Я, Шешенин Сергей Владимирович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук (по специальности 01.02.04), профессор кафедры теории пластичности механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, телефон: +7(495)939-36-14 e-mail: sergey.sheshenin@mail.ru)



С.В. Шешенин