

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Корниевского Александра Сергеевича
«Моделирование и определение эффективных свойств пористых
анизотропных упругих материалов с учетом внутренней структуры и
поверхностных напряжений»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.2.2 – математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ

В последние десятилетия наука и промышленность проявили значительный интерес к целому классу высокопористых материалов, и такие материалы нашли свое применение в большом количестве отраслей. В то же время наноразмерные и наноструктурированных пористые материалы различной природы в будущем могут оказать преобразующее воздействие на различные области науки и техники, такие как разработка лекарств, теплоизоляционных материалов и адсорбентов, химический катализ, усовершенствование датчиков и приводов. К примеру, скаффолды, которые играют важную роль в регенеративной медицине при формировании замещающей функциональной ткани для заживления поврежденного органического материала должны отвечать нескольким требованиям, в числе которых подходящая пористость и адекватные механические свойства. Для изучения и учета физических свойств высокопористых материалов важно корректно описывать их поведение с учетом микроструктуры.

Целью научного исследования Корниевского А.С. является разработка математических и компьютерных моделей для получения эффективных механических свойств пористых и высокопористых материалов на различных масштабных уровнях и проведение на их основе исследований механических свойств в зависимости от конфигурации. Такие модели необходимы для изучения основных закономерностей поведения высокопористых материалов. Имеющиеся на настоящий момент математические модели, как правило, не учитывают все разнообразие геометрических структур и нерегулярные структуры. Построенные в диссертационном исследовании модели позволяют описывать поведение наноструктурированных упругих материалов со случайной структурой пористости, что должно повысить эффективность работ по улучшению свойств пористых материалов.

В диссертации Корниевского А.С. представлены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

- разработаны методы решения задач гомогенизации для пористых анизотропных упругих композитов с возможностями учета поверхностных или интерфейсных напряжений по методу эффективных модулей, поддерживающие энергетические соотношения Хилла;
- разработаны алгоритмы для расположения интерфейсных конечных элементов и расчета полного набора эффективных модулей жесткости для композитов с произвольными типами анизотропии;
- разработаны алгоритмы для генерации регулярных и нерегулярных решеток, составленных из ячеек Гибсона-Эшби;
- проведен численный анализ для задач гомогенизации пористых композитов с поверхностями напряжениями и высокопористых ячеистых композитов и изучен ряд закономерностей.

Теоретическая значимость работы обусловлена развитием методов моделирования и необходимостью разработки алгоритмов для определения эффективных свойств пористых и высокопористых композитов с усложненными механическими свойствами как на макро, так и на наноуровне. Практическая значимость работы заключается в создании инструментов для прогнозирования механических свойств пористых композитов при создании новых высокопористых материалов.

Во введении приводится краткий обзор работы, обоснование актуальности темы диссертационной работы; сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, описана научная новизна, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе приводится обзор подходов к описанию пористых материалов. Дается постановка задач теории упругости с поверхностными и интерфейсными напряжениями для анизотропных неоднородных тел. Во второй части главы описывается схема решения поставленных задач с помощью конечно-элементных аппроксимаций, в том числе с учетом особенностей модели Гуртина-Мурдоха.

Вторая глава посвящена описанию алгоритмов и методов генерации различных представительных объемов для моделирования пористых материалов. Описывается случай представительного объема со случайным распределением пор, композитов со связностью 3-3, в которых сохраняется связность обеих фаз. Рассматривается базовая ячейка Гибсона-Эшби, и

особенности построения нерегулярных решеток из таких ячеек. Получены формула, связывающая толщину ребер и пористость при фиксированном размере каркаса, а также её обобщение, при котором пористость ячейки зависит не только от толщины ребра, но и от размера внутреннего каркаса. Кроме того, описан процесс разбиения области на конечные элементы и продемонстрирована сходимость построенной модели.

В третьей главе на основе построенных моделей проведен численный анализ влияния характеристик различных пористых композитов на их эффективные модули. При различной пористости было произведено сравнение с аналитической моделью Гибсона-Эшби. При обработке результатов для нерегулярных решеток, где размеры ячеек выбирались случайным образом, вычислялись доверительные интервалы согласно критерию Стьюдента. Для анализа влияния геометрии внутреннего каркаса при фиксированной пористости для ячеек с различной геометрической конфигурацией было выполнено три численных эксперимента. Также были рассмотрены наноразмерные базовые ячейки Гибсона-Эшби и проанализировано влияние геометрической структуры и поверхностных эффектов на эффективные свойства композита.

Диссертацию можно квалифицировать как хорошо структурированную и грамотно написанную. Степень обоснованности и достоверности результатов диссертации обеспечивается использованием фундаментальных физико-механических принципов при формулировке задач. Используемые численные методы основаны на корректном применении методов механики деформируемого твердого тела, вычислительной механики и математики.

По работе имеются замечания.

1. В разделе 2.6 приведены результаты численного анализа, на основе которого были определены оптимальные размеры конечных элементов для проведения дальнейших расчетов. Судя по описанию, значения были выбраны после проведения лишь одной серии численных экспериментов при фиксированной пористости и геометрической конфигурации. Не указано в какой степени и почему полученные оценки применимы для всех конфигураций, рассмотренных в диссертационном исследовании. Имело бы смысл рассмотреть несколько «крайних» случаев при обосновании выбора.
2. Хотя структура рисунков продумана, и, в целом, они аккуратно подготовлены и наглядно оформлены есть ряд мелких

погрешностей. Так, на ряде рисунков отсутствуют подписи к осям (например, на Рис. 23-30 не подписаны горизонтальные оси), присутствуют обозначения, требующие пояснений (Рис. 20-21). Кроме того, на одних рисунках «легенды» даны на русском, а на других рисунках на английском языке (ср. Рис. 46-54 и Рис. 55-59).

3. В разделе 3.3 вполне естественным выглядит привлечение методов математической статистики. Автором были вычислены доверительные интервалы. Судя по указанию на с. 72, сразу после формулы (3.3.4), рассматривались выборки малого размера ($n = 5$). В работе не указано, почему пришлось довольствоваться столь малыми выборками при расчетах. Кроме того, не ясна причина, по которой не были привлечены прочие статистические методы, например, различные тесты для проверки гипотез о свойствах распределений относительных эффективных модулей.
4. Автором выполнен довольно подробный анализ при идеальном контакте. Проведение анализа влияния неидеального контакта при разной степени нарушения адгезионных связей между ячейками Гибсона-Эшби было бы также интересным развитием созданных моделей.
5. В работе приведены многочисленные и интересные результаты численного анализа, но практически не приведено результатов сравнения с другими авторами, включая использование численных методов, отличных от метода конечных элементов.

Указанные замечания не затрагивают основных результатов и их можно рассматривать как рекомендации для проведения будущих исследований. Они не снижают моего общего высокого мнения о диссертационной работе.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации полно и подробно представлены в центральной печати.

Диссертационная работа Корниевского Александра Сергеевича «Моделирование и определение эффективных свойств пористых анизотропных упругих материалов с учетом внутренней структуры и поверхностных напряжений» по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Считаю, что диссертационная работа Корниевского Александра Сергеевича «Моделирование и определение эффективных свойств пористых анизотропных упругих материалов с учетом внутренней структуры и поверхностных напряжений» представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой решены современные научные задачи. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 и требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Южном федеральном университете, а ее автор Корниевский Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
Заведующий кафедрой теории функций, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», доктор физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), доцент

Михаил Владимирович Голуб

подпись

«02»» декабря 2023 г.

Подпись Голуба М.В. заверяю



Голуб Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теории функций федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет»
Адрес организации: 350040, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149
Телефон: +7 (861) 219-95-01*315
E-mail: m_golub@inbox.ru

Я, Голуб Михаил Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Корниевского Александра Сергеевича, и их дальнейшую обработку.