

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Товпинца Александра Олеговича на тему: «Модель деформируемого
многокомпонентного дисперсного тела с учетом механохимического
взаимодействия и спекания компонентов», представленную на соискание учёной
степени кандидата технических наук по научной специальности
1.1.8 - Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы. Важными направлениями современной механики деформируемого твердого тела являются разработка моделей и методов анализа напряженно-деформированного состояния тел с учетом их микроструктуры, расчет обусловленных микроструктурой и технологией изготовления элементов конструкций остаточных напряжений, моделирование технологических процессов изготовления структурно-неоднородных материалов. В частности, при моделировании спекания порошков большое практическое значение имеет ответ на вопрос о том, как влияет фазовый и фракционный состав исходного порошкового компакта (заготовки), параметры технологического процесса на свойства материала изделия, изготовленного из этой заготовки, каковы остаточные напряжения в изделии, не произойдет ли потеря устойчивости процесса формирования изделия из порошка при заданных значениях параметров, характеризующих протекание этого процесса. В связи с этим тема диссертации А.О. Товпинца представляется актуальной.

В диссертации развит подход к численному моделированию физико-механических и механохимических процессов, происходящих при изготовлении композиционных материалов посредством спекания многокомпонентных полидисперсных порошков при механических и тепловых воздействиях, предложенный В.Н. Лейциным и М.А. Дмитриевой. **Новизна** исследований, выполненных автором диссертации, состоит в следующем:

- выполнено математическое моделирование процесса формирования микроструктуры композиционного материала в результате спекания полидисперсного порошка, состоящего из тугоплавких и легкоплавких компонент, с учетом деструкции

связующего, исследовано влияние фракционного и химического состава порошка на структуру и пористость получаемого композита;

- получены выражения для оценки остаточных напряжений в композиционном материале, полученном в результате спекания, по данным о составе композита и зависимостям коэффициента теплового расширения его компонент от температуры;

- развита экспериментальная процедура исследования структуры композиционного тела методами микрофокусной компьютерной рентгеновской томографии с помощью анализа восстановленной 3D модели и последующей цифровой обработкой результатов;

- исследованы с использованием современной теории вязкости суспензии Ходакова условия затухания механохимических превращений в динамически уплотняемом порошковом теле типа Zr-B.

Научная значимость диссертационного исследования определяется тем, что в работе получил развитие комплексный подход к моделированию процессов механохимического синтеза и спекания компонентов полидисперсных порошковых компактов при термомеханическом воздействии, исследованию влияния состава этих компактов и параметров термомеханического воздействия на структуру и свойства композиционных материалов, получаемых в результате протекания этих процессов.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты исследования могут быть применены для совершенствования технологий изготовления изделий из низкотемпературных совместно спекаемых керамических композитов (Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC), которые используются при изготовлении микросхем для современных электронных устройств. Подходы к изготовлению композиционных материалов, развитые в диссертации, внедрены в производственную практику ООО «Профтехнологии» (г. Калининград) при проектировании наполненных композитов.

Достоверность результатов исследования определяется корректностью моделей и методов, используемых в работе, и подтверждается удовлетворительным соответствием результатов моделирования и экспериментальных данных.

Структурно диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и трех приложений, содержащих исходные данные для выполненных в

диссертации расчетов и сведения о внедрении результатов работы. Список литературы содержит 133 источника.

Первая глава диссертации содержит обзор публикаций по теме исследований, описание общего подхода к моделированию и математических методов, используемых при решении поставленных задач.

Во **второй главе** описаны математическая постановка задач и общий алгоритм их решения. Получено выражение для расчета объемных остаточных напряжений в матрице спеченного тела. Приведены результаты численного моделирования процессов спекания низкотемпературной керамики (LTCC – для микроэлектроники). В частности, выполнен анализ влияния состава смеси на остаточные напряжения в получаемом композите, построены графики распределения объемных концентраций компонентов и графики распределения остаточных напряжений по толщине изделия. Выполнены расчеты эффективных физико-механических характеристик спеченного тела. Проведены вычислительные эксперименты по расчету структуры спеченного композита для разных модельных фракционных составов порошка и выполнен анализ полученных результатов.

Третья глава диссертации посвящена верификации модели и исследованию особенностей механохимического синтеза тугоплавких компактов. В первом параграфе описан подход к исследованию трехмерной модели образца спеченной керамики с применением методов рентгеновской компьютерной томографии. Выполнено сопоставление результатов вычислительных экспериментов с результатами натурных экспериментов. Сделан вывод о том, что результаты численного моделирования качественно согласуются с результатами лабораторных исследований. Второй параграф этой главы посвящен исследованию устойчивости механохимических процессов, происходящих при спекании порошковых смесей. Установлено, что переход легкоплавкого компонента смеси в жидкое состояние при определенной дисперсности порошка может привести к прекращению механохимического синтеза.

Содержание автореферата полностью отражает содержание диссертационной работы.

По теме диссертации автором опубликовано 16 работ, включая 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела и 3 статьи в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science. Получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Результаты исследований были представлены на различных Российских и международных научных конференциях и семинарах.

Замечания по работе:

1. Остаточные напряжения (рисунок 14 диссертации) зависят от координаты. Будет ли выполняться уравнение равновесия для этих напряжений?
2. Во второй сверху формуле на с. 35 диссертации следует заменить выражение $e - E_a/RT$ на $\exp(-\frac{E_a}{RT})$.
3. В диссертационной работе присутствуют опечатки и неудачные выражения. В частности, неудачными являются фразы «важное значение несут напряжения», «моделям по исследованию механики» (с.6), «комплексный подход исследования влияния» (с.12). В автореферате отсутствует таблица 1, нумерация таблиц начинается с 2.

Указанные замечания не влияют на общее положительное заключение по диссертации.

Заключение

Диссертация Товпинца Александра Олеговича «Модель деформируемого многокомпонентного дисперсного тела с учетом механохимического взаимодействия и спекания компонентов» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела по пунктам 4, 7, 9, 11.

Диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор — Александр Олегович Товпинец, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Я, Зингерман Константин Моисеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

20 октября 2025 года

Официальный оппонент,

заведующий кафедрой математического моделирования и вычислительной

математики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»,

доктор физико-математических наук,

профессор

Тел.: +7-910-533-4087

E-mail: zingerman.km@tversu.ru

Зи

К.М. Зингерман

Подпись К.М. Зингермана удостоверяю.

Проректор по экономике



Н.А. Заривной

М.П.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет»,

170100, Тверская область, г. Тверь, ул. Желябова, д.33;

+7(4822) 34-24-52; rector@tversu.ru; <https://tversu.ru/>

ав