

О Т З Ы В
официального оппонента

на диссертацию Товпинца Александра Олеговича «Модель деформируемого многокомпонентного дисперсного тела с учетом механохимического взаимодействия и спекания компонентов» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата технических наук

Актуальность темы исследований. Объект и предмет исследований.

Диссертационная работа А.О. Товпинца посвящена изучению связи структуры и физико-механических свойств перспективных многокомпонентных композиционных материалов с учетом механохимических превращений при их производстве. Огромная роль в исследованиях такого рода отводится разработке новых моделей и методов численного решения связанных задач механики деформируемых химически реагирующих тел с учетом спекания компонентов в условиях термомеханических воздействий. Подобные исследования отвечают современным запросам промышленности, касающимся развития технологии производства гибридных композиционных материалов, включая материалы для микроэлектроники. Для последних, перспективной является технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (Low Temperature Co-Fired Ceramic, LTCC), которой, в том числе посвящена рассматриваемая работа. Это позволяет утверждать, что выбранная А.О. Товпинцом **тема диссертации является актуальной.**

Цели и задачи диссертационной работы соответствуют современным тенденциям в решении прикладных задач механики деформируемых многокомпонентных сред при механических, тепловых и химических воздействиях методами математического моделирования. Автором решен комплекс важных задач, обеспечивающий полное достижение поставленной в диссертационном исследовании цели, направленной на выявление новых закономерностей между термомеханическими режимами синтеза и спекания реагирующих дисперсных систем, эволюцией их структуры и свойствами полученных материалов, и на базе того разработать способы обоснования технологических режимов получения низкотемпературной керамики.

Анализ публикаций диссертанта показал, что основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 печатных работах в научных журналах, материалах международных и всероссийских конференций, свидетельствах о государственной регистрации программ, из них 9 публикаций в рецензируемых изданиях. В их числе **4 статьи** в журналах (Физическая мезомеханика (К1); Вестник Российского государственного университета им. И. Канта (К2); Вычислительная

механика сплошных сред (K1); Advanced Engineering Research (K2)), входящих 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, **3 статьи** в материалах международных конференций, **индексируемых в Web of Science и SCOPUS**, **1 глава** в монографии, изданной за рубежом и **индексируемой в SCOPUS**, а также **2 свидетельства** о государственной регистрации программ для ЭВМ. В указанных публикациях достаточно полно изложены основные научные результаты диссертации.

Материалы диссертационной работы прошли хорошую апробацию на двух научных семинарах в учреждениях РАН в Перми и Санкт-Петербурге, 13 научных конференциях различного уровня (международных и всероссийских) в Москве, Калининграде, Томске, Херцег-Нови (Черногория).

Анализ содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и трех приложений, имеет общий объем 133 страницы, содержит 32 рисунка и 10 таблиц. Список литературы содержит 133 наименования.

Во введении описана актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определена новизна работы, и изложены научные положения, выносимые на защиту, раскрыты теоретическая и практическая значимость работы, представлены методология и методы исследования, обоснованы достоверность результатов и выводов диссертации, представлены научные проекты, в рамках которых выполнена работа, описаны структура и объем работы, отражен личный вклад автора.

Первая глава «Исследование особенностей связанных процессов в реагирующих средах» содержит литературный обзор по теме исследования. Он написан добротнo и достаточно полно отражает современное состояние исследований в области математического моделирования и численного решения связанных задач синтеза и низкотемпературного спекания дисперсных реагирующих тел, а также некоторых технологических аспектов изготовления перспективных керамических композиционных материалов для микроэлектроники. Вскрыты нерешенные задачи исследования, на которые нацелена диссертационная работа.

Вторая глава «Исследование процессов спекания дисперсного тела» посвящена моделированию механохимического синтеза низкотемпературной совместно обжигаемой керамики и оценке ее физико-механических свойств. В этой главе последовательно рассмотрена физико-математическая постановка задачи с учетом кинетики спекания,

полидисперсности материала, оценки локальных остаточных напряжений в матрице спеченного тела, затем изложен алгоритм решений связанных многопараметрических задач механохимических превращений и спекания; приведены результаты исследования процессов спекания, формирования структуры и остаточных напряжений при производстве низкотемпературных обжигаемых керамик. Особое внимание уделено исследованию возможности формирования субструктуры контактирующих частиц тугоплавких компонентов в таких керамиках, а также связи структуры и эффективных свойств исследуемых керамик. Сравнение результатов расчетов с данными лабораторных исследований структуры спеченных образцов показало их качественное согласие.

В третьей главе «Верификация модели. Исследование особенностей механохимического синтеза деформируемого тела» изложены результаты лабораторных исследований образцов спеченной керамики. Глава начинается с описания подхода к исследованию трехмерной структуры образцов керамики с применением современного метода микрофокусной компьютерной рентгеновской томографии. Затем приведены результаты исследований, свидетельствующие о седиментационном разделении изначально однородной по размерам фракций смеси тугоплавкого компонента и значительной неоднородности концентраций всех компонентов керамики. Полученные результаты согласуются с выводами теоретического исследования в главе 2. Далее теоретически исследуется процесс механохимических превращений с учетом локальной переупаковки частиц в динамически уплотняемом порошковом теле типа цирконий – бор. Для успешного описания экспериментальных результатов использована уточненная модель Ходакова для эффективной вязкости суспензии.

В Заключении приведены основные полученные результаты и сделаны выводы.

Приложение 1 содержит справочные данные по характеристикам компонентов системы « Al_2O_3 – боросиликатное стекло – полиорганосилоксан», в **Приложении 2** приведен акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс БФУ им. И. Канта, а в **Приложении 3** представлен Технический акт внедрения результатов диссертации в производственную практику ООО «Профтехнологии», г. Калининград.

Анализируя выполненное исследование в целом, можно отметить качественно выполненные численные исследования. В диссертации содержатся **новые научные результаты**, полученные автором в ходе выполнения диссертационного исследования, о механизмах формирования многоуровневой структуры взаимодействующих частиц отдельных фракций тугоплавких компонентов низкотемпературной керамики; способах прогноза локальных значений пористости спечённой низкотемпературной керамики на

разных уровнях иерархической структуры; об оценке остаточных напряжений в матрице получаемого композита, определяемых коэффициентами термического расширения матрицы и тугоплавких включений; о механоактивации порошковых систем цирконий – бор при их динамическом деформировании. Это стало возможным благодаря **оригинальным математическим и численным моделям**, предложенным в диссертации, в том числе модели процесса термодеструкции связующего исходного компакта, комплексному подходу к исследованию влияния исходных характеристик многокомпонентных механохимически реагирующих полидисперсных компактов на физико-механические характеристики деформируемых тел, изменяющихся при внешнем термомеханическом воздействии в процессе механохимического синтеза и спекания компонентов. **Впервые** в расчетах установлен механизм затухания механохимической реакции при динамическом нагружении порошкового компакта цирконий – бор за счет смены агрегатного состояния компакта вследствие экзотермических химических взаимодействий реагирующих компонентов с уточнением вязкости суспензии по модели Ходакова.

Значимость полученных результатов для науки определяется развитым комплексным подходом для исследования влияния исходных характеристик многокомпонентных механохимически реагирующих полидисперсных компактов на физико-механические характеристики деформируемых тел, получающихся при внешнем термомеханическом воздействии в процессе механохимического синтеза и спекания компонентов, а также полученными на его основе решениями ряда задач описания состояния твердого деформируемого дисперсного тела с компонентами, способными к механохимическим превращениям и спеканию.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты позволяют формулировать рекомендации по управлению процессами формирования структуры композитов за счет изменения режимов химических превращений и спекания, а так же параметров исходных порошковых компактов. Разработанная модель позволяет обосновывать технологические режимы получения новых низкотемпературных композиционных керамик методами механохимического синтеза и спекания, что в совокупности определяет **практическую значимость работы** и перспективы ее развития.

Обоснованность научных положений, сделанных выводов и рекомендаций обеспечиваются математической корректностью и физической обоснованностью построенных моделей, соответствием полученных результатов численного

моделирования частным решением задач, имеющих аналитическое решение, а также соответствием результатов моделирования и экспериментальных данных для ряда конкретных случаев, согласованных с условиями известных экспериментальных работ, выполненных другими авторами.

Использование в диссертационном исследовании А.О. Товпинца проверенных численных методов решения задач механики деформируемого твердого тела, протестированных программных средств, качественное соответствие полученных расчетных данных о структуре образцов низкотемпературной керамики и компакта $Zr+B$, а также влияния амплитуды импульса нагрузки на степень химических превращений в порошковом компакте $Zr+B$ имеющимся экспериментальным данным других авторов в совокупности позволяют считать **полученные результаты достоверными**.

Вместе с тем, несмотря на вышеизложенное, по диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**, поставить **вопросы**:

1. В литературном обзоре не указана фамилия профессора Князевой Анны Георгиевны, которая внесла значительный вклад в исследования по тематике диссертационной работы, тем более, что в диссертации есть ссылка на формулу, полученную ей и соответствующую статью.

2. В формулировке положения 3 не понятно о каких «параметрах исходной дисперсии» идет речь.

3. В диссертации получено выражение для оценки локальных остаточных напряжений в матрице спеченного тела, но из приведенного в работе описания не понятно, где конкретно локализованы эти напряжения.

4. К сожалению, для части приведенных в Приложении 1 справочных характеристик материалов не указаны размерности.

5. В диссертации встречаются несогласованные окончания, лишние слова, а также небрежность в оформлении списка литературы.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку всей работы, не затрагивают сути основных выводов диссертации и защищаемых положений, не позволяют усомниться в достоверности полученных результатов, научная новизна и значимость которых для науки несомненны.

Оценивая содержание работы в целом, следует отметить, что она представляет собой завершенное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Текст диссертации изложен понятным научным стилем, хорошо графически оформлен.

Автореферат достаточно полно отражает содержание, основные идеи и выводы диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Товпинца Александра Олеговича «Модель деформируемого многокомпонентного дисперсного тела с учетом механохимического взаимодействия и спекания компонентов» соответствует паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела по пунктам 4, 5, 6, 7 и 11, выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит решение задачи об установлении закономерностей между термомеханическими режимами синтеза и спекания реагирующих дисперсных тел, эволюцией их структуры и свойствами получаемых материалов, имеющей существенное значение для развития механохимии и механики композиционных материалов и конструкций.

Диссертация соответствует всем критериям, установленным п.п. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата наук, а ее автор — Александр Олегович Товпинец, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Я, Смолин Игорь Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

15 октября 2025 года

Официальный оппонент,
заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и
многоуровневых систем ИФПМ СО РАН

доктор физико-математических наук, профессор
тел. 8(3822) 286875, e-mail: smolin@ispms.ru

Смолин Игорь Юрьевич

Подпись Смолина И.Ю. 
Ученый секретарь ИФПМ СО
кандидат физико-математических наук

Федеральное государственное
Институт физики прочности и
Сиби́рского отделения Росси́йской акаде́мии наук,
634055, г. Томск, просп. Академический, д. 2/4,
Телефон: +7 (3822) 49-18-81, E-mail: root@ispms.tomsk.ru

 Матолыгина Наталья Юрьевна
физико-математических наук