

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации

Болтачева Грэг Шамилевича

"ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ",

представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальностям:

01.04.07 – физика конденсированного состояния

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Работа посвящена актуальной проблеме - разработке фундаментальных основ компактирования нанопорошковых (нанокерамических) материалов, представляющей несомненный интерес для ряда областей, включая электронику, водородную энергетику, фармацевтику, экологию, что определяется высокими прочностными и антикоррозионными свойствами перспективных конструкционных материалов на основе оксидов металлов (Al_2O_3 , ZrO_2), работающих при интенсивных воздействиях механической, химической, тепловой природы.

Значимость работы обусловлена особенностями компактирования нанопорошков в сопоставлении с традиционными методами консолидации порошковых материалов и связанными с низкой уплотняемостью и проявлением размерного эффекта: ростом давления компактирования при уменьшении размера частиц и, как следствие, превышением необходимых давлений квазистатического прессования пределов прочности технологического оборудования. Методы прессования при воздействиях высокой интенсивности, реализуемые при ударно-волновом нагружении, не позволяют реализовать надежные технологические процессы прессования в связи со сложной динамикой волновых фронтов, вероятностью появления волн «разрежения».

Оригинальность исследования

В связи с отмеченными проблемами квазистатического и ударно-волнового прессования применительно к нанокерамическим порошковым материалам оригинальность работы обосновывается необходимостью изучения закономерностей компактирования в промежуточной области скоростей деформаций ($\sim 10^2$ - 10^3 c^{-1}), характерных для динамического диапазона интенсивностей нагружения и реализуемых в магнитно-импульсном режиме, что обеспечивает пористость менее 30% и, как следствие, эффективность последующего спекания и сохранения структуры.

Состояние проблемы характеризуется тем, что, несмотря на перспективность магнитно-импульсного режима прессования, до настоящего времени не объяснены физические механизмы улучшения прессуемости, из которых выделяются роль инерционных эффектов, что предполагает разработку моделей, учитывающих динамику электро-магнитного воздействия и динамику

уплотняемой нанокерамической порошковой системы. С учетом достигнутых результатов в использовании магнитно-импульсных режимов обработки материалов давлением, вторая задача является, по-видимому, ключевой и предполагает формулировку проблемы «динамики уплотнения» на основе уравнений состояния компактируемой среды и определяющих соотношений, отражающих сопротивление материала сдвиговому деформированию, учет эффектов уплотнения и структурных механизмов релаксации (диссипации), определяемых условиями трения на межчастичных контактах. Необходимо отметить, что применение постановок, традиционных для структурных элементов микронного размера или обнаруживающих пластичность, проблематично применительно к оксидным нанопорошкам, для которых несвойственно пластическое деформирование и существенно влияние размерных эффектов. С целью преодоления отмеченных недостатков теории пластически-упрочняющегося пористого тела применительно к нанокерамическим материалам и учета основного структурного фактора – высокого уровня сил дисперсионного притяжения, в работе предложено описание поведения представительного объема нанопорошка в рамках метода гранулярной динамики. Анализируемые в работе нанопорошки, получаемые методом лазерной абляции и электрического взрыва проводников, представляют собой адекватный объект для численного моделирования в связи с высокой сферичностью и прочностью частиц и, как следствие, возможностью описания поведения системы с учетом упругого взаимодействия между частицами вплоть до экстремально высоких напряжений. Естественный учет в рамках метода гранулярной динамики сил дисперсионных притяжений позволяет исследовать закономерности проявления размерного эффекта в процессах компактирования нанокерамических порошковых систем. Построение теоретических моделей, учитывающих особенности межчастичных взаимодействий в наноразмерных порошках с целью описания макроскопических механических свойств порошкового тела, включая размерные эффекты при компактировании, и обоснование моделей процессов магнитно-импульсного прессования является **ключевой задачей диссертации**. Описание межчастичных взаимодействий построено в приближении сферичности упругих частиц с учетом упругих и дисперсионных взаимодействий в нанопорошках в рамках обобщения подхода Герца для случая конечных деформаций и моделирования с использованием метода гранулярной динамики. Сопоставление с экспериментальными данными о компактировании оксидных нанопорошков явилось основой для **верификации полумпирических моделей** упрочняющегося пластического пористого тела при моделировании динамических процессов магнитно-импульсного компактирования (одноосное прессование в металлических матрицах и радиальное прессование по схемам Z и Θ -пинчей).

Постановки носят «связанный» характер, дифференциальные уравнения описывают согласованную динамику генерации импульсного магнитного поля и динамику упрочняющегося пластического пористого тела, проанализирован инерционный эффект и показана возможность

достижения давлений прессования, существенно превышающих "давления" исходного магнитного поля.

Структура диссертации включает Введение, в котором обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание работы, пять Глав и Заключение, в которых детально описаны основные методы и результаты, изложены выводы по разделам работы и диссертации в целом.

В Первой главе представлен анализ межчастичных взаимодействий в оксидных нанопорошках, обоснована оригинальная стержневая модель контакта, представляющая собой обобщение контактной модели Герца для случая конечных деформаций, и имеющая физически корректные асимптотики в области малых деформаций частиц. Полученные взаимосогласованные представления для силы упругого отталкивания и распределения нормальных напряжений в области контакта позволили корректно сформулировать в рамках стержневой модели задачу о тангенциальном взаимодействии прижатых частиц при их сдвиге параллельно плоскости контакта (задача Миндлина), провести анализ для случая вращения прижатых частиц, развить теоретический подход по описанию образования и разрушения прочных межчастичных связей химической природы, модифицировать соотношение Гамакера для случая дисперсионного притяжения наночастиц, предложить объяснение эффекта запаздывания на основе представлений сил притяжения в ансамбле наночастиц.

Во Второй главе представлено обоснование дискретных моделей порошкового тела и результаты вычислительных экспериментов в рамках метода гранулярной динамики, позволившие развить алгоритмы формирования начальных (стартовых) структур, отражающие "гравитационный", "коллоидный" и «кластерные» сценарии для «создания» двухмерных и трехмерных бесконечно-периодических связанных кластеров. Результаты вычислительных экспериментов были положены в основу моделирования схем по квазистатическому компактированию нанопорошков в двухмерной и трехмерной постановке, качественного анализа закономерностей процессов компактирования для сопоставления с данными натурных экспериментов. Результаты моделирования показали, что дисперсионные силы притяжения являются основным фактором, отвечающим за наличие размерных эффектов в процессах холодного прессования оксидных нанопорошков, что позволило достичь удовлетворительного согласия с экспериментальными данными о плотности порошковых наноконпозиций, провести анализ различных процессов компактирования (одноосное прессование, двухстороннее и радиальное сжатие, всестороннее прессование, одноосное уплотнение с одновременным сдвиговым деформированием). Развита феноменологическая модель, основанная на введении поверхностей нагружения пластически-упрочняемого пористого тела в пространстве инвариантов тензора напряжений.

В Третьей главе развивается континуальное описание порошковых систем, основанное на феноменологии пластичного пористого тела. Материальные параметры феноменологических моделей, используемых для количественного описания процессов магнитно-импульсного прессования по схемам Z- и Θ -пинчей, определены по зависимостям одноосного уплотнения различных нанопорошков на основе оксида алюминия. Соотношения, определяющие взаимосвязь различных компонент тензора напряжений с текущей плотностью наноконструкции, применялись для описания процессов осесимметричного радиального сжатия цилиндрических порошковых заготовок, как цельных, так и при наличии жесткого стержня на оси симметрии. Результаты численных экспериментов показали, что квазистатические постановки процессов радиального сжатия существенно занижает плотности прессовок и согласие с имеющимися экспериментальными данными предполагает учет динамики и инерционных эффектов в системе "оболочка-порошковая система". Представлен анализ и сформулированы ограничения используемой теории пластически-уплотняемого пористого тела. Показано, что симметрия поверхности нагружения не позволяет адекватно описывать сдвиговые деформации и обнаруженную в нанопорошках положительную дилатансию; выявлена неприменимость ассоциированного закона к определению тензора деформаций в нанопорошках в сложном напряженном состоянии.

В Четвертой главе представлена теоретическая модель, отражающая динамику электрического контура для генерации импульсного магнитного поля и динамику механической системы в процессе одноосного компактирования нанопорошков на магнитно-импульсном прессе. Показано, что модель удовлетворительно воспроизводит экспериментальные характеристики процесса: временные развертки тока в электрическом контуре и временные развертки осевого давления в уплотняемом порошке. На основе построенной теоретической модели проведен анализ влияния на конечную плотность компакта и эффективность процесса компактирования таких параметров, как масса концентратора, объем порошка, диаметр заготовки, что позволило обосновать способы повышения эффективности одноосного прессования при увеличении индуктивности электрического контура, перехода к двухстороннему прессованию двумя симметрично расположенными ударниками. Исследованы ударно-волновые режимы работы магнитно-импульсного пресса, когда стадии ускорения ударника и уплотнения порошка разнесены по времени за счет создания начального зазора между ударником и порошком. На основе полученных решений показано, что основные потери энергии при ударно-волновом уплотнении связаны с неидеальностью отражения ударного фронта на границах уплотняемого порошкового тела с верхним и нижним пуансонами, а максимальное уплотнение, достигаемое при многократном ударном воздействии, определяется величиной акустического сопротивления материала пуансонов.

В Пятой главе представлен анализ результатов моделирования процессов радиального уплотнения цилиндрических порошковых заготовок в проводящих оболочках по схемам Z- и Θ -пинчей. Показано, что учет инерционных свойств компакта при магнитно-импульсном прессовании позволяет достичь согласия с имеющимися экспериментальными данными о конечной плотности прессовок. Исследованы инерционные эффекты, приводящие к немонотонному изменению (осцилляциям) конечной плотности прессовки. Локализованы промежуточные "резонансные" условия, обеспечивающие эффективное использование инерционных свойств механической системы для достижения максимальной конечной плотности прессовки. Обнаружена высокая эффективность схемы Θ -пинча в применении к массивным цилиндрическим порошковым заготовкам, и схемы Z-пинча — для прессования тонких цилиндрических слоев. Установлен безразмерный комплекс, содержащий инерционные характеристики механической системы (плотности и толщины порошка и оболочки) и параметры импульса магнитного поля (амплитуда, длительность), который определяет динамику процесса компактирования, и локализован интервал его значений, отвечающий "резонансным" условиям прессования. Построена теоретическая модель Θ -пинча, учитывающая диффузию магнитного поля для прессования в относительно тонкостенных проводящих оболочках. Показано, что развитая теоретическая модель удовлетворительно воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные, как по размеру расширяемых проводящих оболочек, так и по конечной плотности уплотняемых компактов.

Научная новизна результатов подтверждается:

-Впервые предложенным в рамках оригинальной стержневой модели обобщением закона Герца, позволившим описать упругое взаимодействие сферических частиц в широкой области деформаций и напряжений, определить распределение нормальных напряжений в контактной области, силу упругого отталкивания, оценить рост сил отталкивания в нелинейной области при сохранении физически корректных асимптотик в пределе малых деформаций.

-Впервые установленным, на основе модификации формулы Гамакера для дисперсионного притяжения макрочастиц, представлением энергии, позволяющим «раскрыть» сингулярность взаимодействие наночастиц на сколь угодно малых расстояниях, вплоть до их касания на основе введения параметра "минимального зазора" между внешними молекулами макрочастиц при их касании. Величина зазора определена на основе асимптотического перехода от взаимодействия макрочастиц к взаимодействию отдельных молекул.

-Впервые предложенным и обоснованным модельным потенциалом межмолекулярного взаимодействия, учитывающим эффект запаздывания на относительно больших расстояниях (100 нм и более) и позволившим реализовать аналитически интегрирование по Гамакеру на масштабах, соответствующих энергии броуновского движения в жидкой среде, что является актуальным в

задачах по описанию динамики коллоидных суспензий, используемых на стадии производства нанопорошков.

-Предложенными и обоснованными дискретными моделями нанопорошков, проявляющих слабую тенденцию к агломерации и сильно агломерированных в зависимости от состояния поверхности частиц, количества адсорбированных веществ; установлена методами вычислительного эксперимента, основанными на подходах гранулярной динамики, связь размерных эффектов в процессах компактирования наноразмерных порошков с дисперсионным притяжением наночастиц; показано соответствие результатов дискретного моделирования данным натурных экспериментов по компактированию нанопорошков различной дисперсности.

-Результатами вычислительных экспериментов на основе метода гранулярной динамики, позволивших обнаружить слабую чувствительность нанопорошков к схеме приложения внешних нагрузок. Показано, что в отличие от порошков микронного и более крупного размера, достигаемая плотность компакта из наноразмерных порошков, в основном, определяется максимальной компонентой тензора напряжений и слабо меняется при переходе от одноосного прессования к всестороннему.

-Результатами моделирования сдвигового нагружения порошкового тела при постоянном объеме, которыми установлена (при относительных плотностях выше 30%) существенная положительная дилатансия нанопорошков, построены поверхности нагружения модельных систем в координатах «среднее напряжение–интенсивность девиатора.

-Обоснованием полуэмпирической модели пластически-уплотняемого нанопорошкового материала и методом определения параметров модели (закон упрочнения) по экспериментальным адиабатам одноосного сжатия; показано, что в рамках квазистатического нагружения невозможно описание уплотнения нанопорошков, достигаемое при динамических режимах магнитно-импульсного нагружения (схемы Z- и Θ -пинчей). Сопоставление с результатами вычислительных экспериментов позволило установить область применимости полуэмпирических моделей, в том числе, ассоциированного закона.

-Обоснованием теоретической модели компактирования порошков на одноосном прессе, позволившим с достаточно высокой точностью воспроизводить экспериментальные временные развертки тока в электрическом контуре, давлений прессования; изучены возможные способы повышения эффективности процесса одноосного прессования и показано, что увеличение индуктивности и емкости электрического контура является эффективным методом увеличения давления прессования.

-Результатами численного анализа ударно-волновых режимов работы одноосного прессы при инициировании ударных волн малой амплитуды с учетом отражений на контактных границах; показано, что низкая эффективность ударно-волнового режима работы одноосного прессы в связана с неидеальностью отражения волнового фронта на границах уплотняемой среды.

Проведенный анализ максимального уплотнения порошка при многократном ударном воздействии показал, достигаемая плотность определяется акустическим сопротивлением пуансонов и слабо зависит от масс порошка и ударника.

-Результатами анализа нагружения системы модельным (гармоническим) импульсом внешнего давления, что позволило установить инвариантный (автомодельный) характер процесса по отношению к пропорциональному изменению размеров, обнаружить эффекты периодичности, приводящие к немонотонным зависимостям конечной плотности компакта от характеристик модельного импульса давления. Установлены "резонансные" условия прессования, эффективно использующие инерционные свойства механической деформируемой системы, и показано, что основное уплотнение происходит в момент первого максимума импульса внешнего давления.

- Результаты вычислительного эксперимента о компактировании порошков по схеме Θ -пинча, обнаружившим соответствие с экспериментальными данными о пространственно-временных распределениях магнитных и температурных полей, динамике механической системы, включая расширение проводящей оболочки на заключительной стадии процесса.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы подтверждается новыми фундаментальными результатами по описанию межчастичных упругих взаимодействий в оксидных нанопорошках в условиях высоких внешних давлений, положенных в основу оригинальной стержневой модели контактного взаимодействия и межмолекулярного потенциала, что позволило получить аналитическое представление для энергии дисперсионного притяжения частиц с учетом эффекта запаздывания, установить связь механизмов дисперсионные притяжения и размерных эффектов в процессах компактирования нанопорошков; обосновать методами вычислительного эксперимента феноменологию пластического упрочнения пористой компактируемой среды, провести анализ в рамках связанных постановок процессов магнитно-импульсного прессования с явным учетом динамических эффектов.

Практическая значимость работы подтверждается соответствием теоретических моделей, учитывающих динамику электрического контура, генерирующего импульсное магнитное поле, динамику механической системы и экспериментальных данных по одноосному и радиальному прессованию по схемам Z- и Θ -пинчей, что позволило оптимизировать процессы магнитно-импульсного динамического прессования.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации результаты имеют, несомненно, высокую научную и практическую ценность и могут быть рекомендованы для использования в научных организациях, в том числе, ИМСС УрО РАН, ИФМ УрО РАН, ИЭФ УрО РАН, ИФПМ СО РАН, Томском национальном

исследовательском университете, Пермском национальном исследовательском политехническом университете, а также в научно-промышленных центрах и предприятиях, использующих технологии компактирования при высоком давлении.

Разработанная дискретная модель порошкового тела может быть эффективно применена для оптимизации структурно-чувствительных параметров, определяемых свойствами многомасштабных конгломератов наночастиц.

Обоснованные в работе модели магнитно-импульсного динамического компактирования могут быть применены для разработки новых технологических процессов создания наноструктурных керамических материалов.

Общие вопросы и замечания по работе

1. При построении феноменологической модели пластически упрочняемой компактируемой среды отмечается ограниченная применимость ассоциированного закона и представлений, основанных на понятии поверхности нагружения, что является естественным, принимая во внимание роль эффектов инерционности в области динамического деформирования компакта и возможных проявлений сдвиговой неустойчивости. Представляется целесообразным исследование связи структурных особенностей, определяемых механизмами дисперсионного притяжения, размерными эффектами с проявлениями сдвиговой неустойчивости, которые могут играть заметную роль в динамике компактирования в условиях различных сценариев кластеризации, определяемых развиваемой стержневой моделью.

2. Установленные инвариантные по отношению к комплексу размерных переменных режимы деформирования, проявляющиеся в эффектах периодичности, немонотонных зависимостях конечной плотности компакта от характеристик импульса давления, являются, по-видимому, следствием существования автомодельного решения уравнений динамики пластически компактируемой среды, определяемого нелинейным характером упрочнения. С учетом структурных закономерностей пластической деформации естественно предположить автосолитонную природу развития автомодельных мод локализованной пластичности, обеспечивающих наблюдаемую масштабную инвариантность.

3. Наблюдаемые «резонансные» режимы компактирования и существование безразмерных комплексов, определяющих «выход» на резонансные режимы, является, по-видимому, также следствием существования автомодельных решений, имеющих природу промежуточно-асимптотических решений первого рода. Таким образом, построение этих решений в явной форме на основе анализа уравнений динамики компактируемой среды может существенно облегчить поиск оптимальных режимов динамического компактирования.

4. Работа несвободна от стилистических неточностей и использования «оригинальных» определений в области феноменологической теории пластичности со сложившимися определениями теорий пластического деформирования.

Перечисленные замечания не снижают уровень высокой оценки работы и приведены с целью развития содержательных результатов работы в дальнейших исследованиях. В целом работа представляет актуальное, глубокое и содержательное исследование, включающее изучение фундаментальных аспектов сложного явления, и имеет, несомненно, важное практическое значение.

По содержанию диссертации опубликованы 23 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, и 16 работ в профильных научных изданиях. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Болтачева Грэя Шамилевича выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-исследовательской работой и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – физика конденсированного состояния и 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Зав. лабораторией
Физических основ прочности
ИМСС УрО РАН,

д.ф.-м.н., профессор

О.Б. Наймарк
7 мая 2015 г.

Подпись д.ф.-м.н. Наймарка О.Б. заверяю:
Ученый секретарь ИМСС УрО РАН,
к.ф.-м.н.



Н.А.Юрлова

Наймарк Олег Борисович,
доктор физ.-мат.наук,
01.04.07 – физика конденсированного состояния,
профессор, зав.лабораторией Физических основ прочности ИМСС УрО РАН
614013, Пермь, ул.акад.Королева, 1.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред
УрО РАН

Тел.: +7-342-2378 389. Электронный адрес: naimark@icmm.ru.