

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Болтачева Грэя Шамилевича «Особенности механических свойств наноразмерных порошков и их влияние на процессы магнитно-импульсного компактирования», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – физика конденсированного состояния и 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки в диссертационном совете Д004.024.01 при ФГБУН «Институт электрофизики УрО РАН» по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

**Актуальность.** Проблема уплотнения гранулированных сред и, в частности, компактирования наноразмерных порошковых материалов представляет значительный интерес в связи с развитием методов получения материалов с новыми уникальными свойствами. Кроме того, порошковая металлургия обладает рядом неоспоримых преимуществ, в частности, достаточно развитые технологии позволяют получать после спекания изделие практически точно заданных размеров и формы, то есть реализовать, по сути, безотходное производство.

В экспериментах по компактированию наноразмерных порошковых материалов была установлена крайне низкая их уплотняемость в сравнении с результатами по компактированию микроразмерных порошковых материалов, что, в конечном итоге, привело к созданию магнитно-импульсных методов прессования нанопорошков. Хотя перспективность использования магнитно-импульсных методов прессования была продемонстрирована еще в 90-х годах, реализация этих методов для решения практических задач наблюдается лишь в настоящее время. Отсутствие понимания процессов, протекающих при компактировании нанопорошковых материалов, является, пожалуй, одной из главных причин задержки развития перспективной технологии.

Поскольку данная диссертационная работа посвящена исследованию физической природы взаимодействия отдельных частиц, которое определяет механические свойства наноразмерных порошков, разработке теоретических моделей процессов магнитно-импульсного прессования и проведению на их основе исследований режимов компактирования, ее **актуальность** не вызывает сомнений.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, представляющих оригинальную часть исследований, заключения и списка опубликованных

по теме диссертации 24 публикаций. Объем диссертации 284 страниц. Диссертация включает 136 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 289 наименований.

**Во введении** 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.

**В первой главе «Межчастичные взаимодействия в оксидных нанопорошках»** даны описания упругих нормальных и тангенциальных взаимодействий наночастиц, образования прочных связей в результате спекания частиц или их сильного механического прижатия друг к другу, притяжения сферических частиц посредством дисперсионных сил и учета эффекта запаздывания в дисперсионном притяжении частиц.

Предложена оригинальная стержневая модель контакта, которая представляет собой обобщение традиционной контактной модели Герца. Данная модель имеет физически корректные асимптотики как в области малых деформаций частиц, где она переходит в модель Герца, так и в области больших деформаций и напряжений, где она дает более сильное отталкивание, что согласуется с известными литературными данными по моделированию упругих частиц методом конечных элементов. В рамках стержневой модели получены взаимосогласованные выражения для силы упругого отталкивания и для распределения нормальных напряжений в области контакта. Последнее позволило корректно сформулировать для стержневой модели задачу о тангенциальном взаимодействии прижатых частиц при их сдвиге параллельно плоскости контакта. Проанализировано и представлено в более простом виде решение Егера для задачи о вращении прижатых частиц.

Представлен теоретический подход по описанию образования и разрушения прочных межчастичных связей химической природы.

Для описания сил дисперсионного притяжения частиц модифицировано известное выражение Гамакера, в которое введен дополнительный параметр — расстояние минимального сближения частиц, устраняющий сингулярность в классическом выражении в случае непосредственного касания частиц. Величина введенного параметра определена на основе предельного перехода к взаимодействию отдельных молекул.

Проанализировано влияние эффекта запаздывания на величину сил притяжения. Предложен модельный потенциал, который учитывает эффект запаздывания.

**Во второй главе «Моделирование процессов компактирования методом гранулярной динамики»** построены дискретные модели порошкового тела и представлены результаты компьютерных экспериментов в рамках метода гранулярной динамики.

Для формирования начальных структур использованы различные алгоритмы, позволяющие создавать двумерные или трехмерные бесконечно-периодические связные кластеры.

Компьютерные эксперименты по квазистатическому компактированию нанопорошков поставлены как в двумерной геометрии, для качественного анализа основных закономерностей изучаемых процессов, так и в трехмерной геометрии — для непосредственного сопоставления с имеющимися данными натуральных экспериментов. В результате выполненного моделирования показано, что дисперсионные силы притяжения являются основным фактором, отвечающим за наличие размерных эффектов в процессах холодного прессования оксидных нанопорошков. Их учет позволяет достичь удовлетворительного согласия с экспериментальными данными о плотности порошковых прессовок.

В рамках гранулярной динамики проанализированы различные процессы компактирования: одноосное прессование в металлической матрице, двухстороннее (или радиальное) сжатие, всестороннее прессование, одноосное уплотнение с одновременным сдвиговым деформированием, и чисто сдвиговая деформация модельных систем без изменения объема. На основе сопоставления с данными натуральных экспериментов установлены все необходимые параметры различных модельных систем: система без образования прочных межчастичных связей и система с образованием и разрушением прочных связей химической природы.

Обнаружена, подтвержденная натурными экспериментами, слабая чувствительность оксидных нанопорошков к геометрии внешнего нагружения.

Моделирование сдвиговых деформаций выявило положительную дилатансию нанопорошков: при относительных плотностях выше 30% сдвиговое деформирование модельных систем приводит к росту среднего (гидростатического) давления в системе.

Построены поверхности нагружения различных модельных систем; показано, что в пространстве инвариантов тензора напряжений эти поверхности можно аппроксимировать кривыми эллиптического типа, сдвинутыми относительно девиаторной оси в сторону гидростатического сжатия. Последнее позволяет применить теорию пластично-упрочняемого пористого тела для феноменологического описания нанопорошков.

**В третьей главе «Континуальное описание порошкового тела»** излагается в рамках феноменологии пластичного пористого тела модель компактирования нанопорошковых материалов.

Свободные параметры теории, необходимые для количественного описания процессов по магнитно-импульсному прессованию в условиях Z- и  $\Theta$ -пинчей, определены по кривым одноосного уплотнения различных нанопорошков на основе оксида алюминия. Найдены необходимые соотношения для описания процессов осесимметричного радиального сжатия цилиндрических порошковых заготовок, как цельных, так и при наличии жесткого стержня на оси симметрии.

На основе известных результатов классической задачи Ламе о распределении упругих напряжений в цилиндрической оболочке рассчитана разность давлений, снаружи и изнутри, которая компенсируется проводящей оболочкой в процессе ее пластичного деформирования. В результате численных оценок показано, что квазистатическое рассмотрение процессов радиального сжатия существенно занижает плотности прессовок, т.е. для достижения согласия с имеющимися экспериментальными данными необходимо учитывать динамику процесса и инерционные свойства деформируемых систем "оболочка + порошок". Установлено, что в основной толще порошковой заготовки, за исключением лишь области непосредственно прилегающей к внутреннему несжимаемому стержню, применима модель однородного уплотнения.

Проанализированы недостатки и ограничения используемой теории пластично-уплотняемого пористого тела: 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 сложно-напряженных условиях.

**Четвертая глава «Одноосное компактирование нанопорошков на магнитноимпульсном прессе»** посвящена теоретическому описанию и изучению процессов одноосного компактирования нанопорошков на магнитно-импульсном прессе.

Построена теоретическая модель, которая включает решение системы дифференциальных уравнений, описывающих совместную динамику переходных процессов в электрическом контуре, обеспечивающем генерацию импульсного магнитного поля, и динамику механической системы, которая включает разгоняемые части пресса и уплотняемый порошок. Показано, что модель удовлетворительно воспроизводит все

доступные экспериментальные характеристики процесса: временные развертки тока в электрическом контуре и временные развертки осевого давления в уплотняемом порошке.

На основе построенной теоретической модели проанализировано влияние на конечную плотность компакта и эффективность процесса компактирования таких параметров, как масса концентратора, объем порошка, диаметр заготовки. Обнаружены способы существенного повышения эффективности одноосного прессования за счет увеличения индуктивности электрического контура, либо за счет перехода к двухстороннему прессованию двумя симметрично расположенными ударниками.

Проанализирована возможность работы магнитно-импульсного прессы в ударном режиме, когда стадии ускорения ударника и уплотнения порошка разнесены по времени за счет создания начального зазора между ударником и порошком. Порошковая засыпка при такой постановке эксперимента уплотняется на фронте ударной волны, который возникает в момент соприкосновения ударника с порошком. В приближении ударных волн малой амплитуды задача об ударно-волновом уплотнении порошка сведена к системе линейных дифференциальных уравнений, для которых получено аналитическое решение. На основе полученных решений показано, в частности, 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 «Радиальное компактирование нанопорошков в проводящих оболочках»** анализируются процессы радиального уплотнения цилиндрических порошковых заготовок в проводящих оболочках по схемам Z- и  $\Theta$ -пинчей.

В приближении однородного уплотнения порошка задача о динамике механической деформируемой системы "оболочка + порошок" сведена к одному обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка, что существенно облегчает как теоретический анализ, так и проведение численных расчетов. Показано, что учет инерционных свойств механической системы позволяет достичь согласия с имеющимися экспериментальными данными о конечной плотности прессовок, полученных как по схеме Z-пинча, так и по схеме  $\Theta$ -пинча. Проанализировано влияние радиальных размеров системы "оболочка + порошок + стержень" на процесс уплотнения, выявлены закономерности масштабирования.

Исследования влияния длительности импульса магнитного поля на процесс коактирования обнаружили различные инерционные эффекты, приводящие к немонотонному изменению (осцилляциям) конечной плотности прессовки. Локализованы промежуточные "резонансные" условия, при которых за счет максимально эффективного использования инерционных свойств механической системы достигается максимальная конечная плотность прессовки, соответствующая давлениям квазистатического воздействия, на порядок превышающих "давление" на проводящую оболочку со стороны генерируемого магнитного поля. Обнаружена высокая эффективность схемы  $\Theta$ -пинча в применении к массивным цилиндрическим порошковым заготовкам, и схемы  $Z$ -пинча — для прессования тонких цилиндрических слоев. В последнем случае 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 коактирования, и локализован интервал его значений, отвечающий "резонансным" условиям прессования.

Для прессования в относительно тонкостенных проводящих оболочках построена теоретическая модель  $\Theta$ -пинча, учитывающая: диффузию магнитного поля, как внутрь оболочки, так и в толщу витков внешнего соленоида; нагрев материалов оболочки и соленоида, связанный с выделением джоулевого тепла и с потерями энергии на пластическое деформирование оболочки.

Анализ полученных решений позволил определить область геометрических размеров проводящей оболочки (толщина и диаметр), в которой действие остаточного магнитного поля должно приводить к расширению оболочки. Сам процесс расширения проводящих оболочек, а также процессы коактирования порошков, исследован в результате численного решения полной системы уравнений  $\Theta$ -пинча. Показано, что развитая теоретическая модель удовлетворительно воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные, как по размеру расширяемых проводящих оболочек, так и по конечной плотности уплотняемых компактов.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы.

**Научная новизна** полученных автором диссертации результатов определяется в первую очередь тем, что в работе впервые выполнено комплексное теоретическое исследование физической природы взаимодействия отдельных частиц, которое определяет механические

свойства наноразмерных порошков, процессов магнитно-импульсного прессования и режимов компактирования наноразмерных порошковых материалов.

**Обоснованность и достоверность результатов.** Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается применением широко апробированных методов изучения порошковых тел, обоснованным выбором физических приближений и, главным образом, согласием теоретических результатов с имеющимися экспериментальными данными.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определяется совокупностью полученных новых фундаментальных научных результатов. Можно выделить следующие основные достижения автора, отражающие теоретическую и практическую ценность работы:

Даны описания упругих нормальных и тангенциальных взаимодействий наночастиц, образования прочных связей в результате спекания частиц или их сильного механического прижатия друг к другу, притяжения сферических частиц посредством дисперсионных сил и учета эффекта запаздывания в дисперсионном притяжении частиц.

Построены дискретные модели порошкового тела и получены новые результаты компьютерных экспериментов в рамках метода гранулярной динамики, в частности, найдены поверхности нагружения оксидных нанопорошков, что позволило описать процесс компактирования наноразмерных порошковых материалов в рамках теории пластично-упрочняемого пористого тела.

Построена теоретическая модель, которая описывает совместную динамику переходных процессов в электрическом контуре, обеспечивающем генерацию импульсного магнитного поля, и динамику механической системы, которая включает разгоняемые части пресса и уплотняемый порошок.

Установлен механизм инерционного уплотнения порошков в магнитно-импульсных процессах радиального прессования по схемам Z- и  $\Theta$ -пинчей, установлены резонансные условия, в которых максимально эффективно используются инерционные свойства механической деформируемой системы "оболочка + порошок".

Из сказанного можно заключить, что полученные в диссертационной работе результаты являются важной составляющей научной базы технологии магнитно-импульсного прессования наноразмерных порошковых материалов.

### **Замечания по диссертационной работе.**

1. На стр. 8 диссертационной работы автор говорит о методе гранулярной динамики как о микроскопическом подходе описания рассматриваемой системы. Термин «микроскопический подход» в таком же смысле употребляется в работе неоднократно. Общепринято считать, что термин «микроскопический подход» употребляется применительно к атомным системам, а в данном случае речь идет о мезоскопическом подходе. Далее на стр. 60 автор именно об этом и говорит, но при этом он вводит термин «*истинно* микроскопический подход», чего можно было и не делать, используя стандартную терминологию.

2. Параграф 5.3.3 диссертационной работы называется «Теоретическая модель компактирования порошка». Такое название можно было бы дать всей диссертационной работе. Данный параграф можно было озаглавить более конкретно, например, «Самосогласованная модель компактирования порошка», что более точно отражает содержание этого параграфа.

3. На стр. 93 вводится тензор скоростей деформации для квазистатического процесса деформирования. В данном случае было бы уместнее говорить о тензоре деформации.

4. В параграфе 2.1 «Методика расчетов» дано описание методики расчета процесса компактирования: приводятся формулы межчастичного взаимодействия, далее идет описание компьютерных экспериментов, включающее описание формы ячеек в 2D и 3D геометриях, а далее опять уравнения – уравнение движения, формулы для вычисления сил. Такой стиль изложения сильно затрудняет чтение. Более естественным представляется в начале изложение математической модели в виде системы уравнений, а затем метод компьютерной реализации. Одна и та же математическая модель обычно может быть реализована с помощью различных численных алгоритмов.

5. На стр. 118 приводится рис.3.3, где представлены сравнения результатов расчетов с экспериментом без всякого обсуждения, что вызывает большое недоумение. Однако обсуждение этого рисунка приводится на стр. 121 в другом параграфе.

6. Во введении и в главе 4 обсуждается вопрос о серьезных проблемах, связанных с достижением необходимой плотности при компактировании наноразмерных порошков. И хотя в результате большого объема исследований, проведенных и автором данной работы и экспериментальной группой, многие проблемы были решены, остался без обсуждения вопрос о конкурентоспособности технологий, основанных на применении наноразмерных и микроразмерных материалов.



7. По итогам исследований в главе 4 нет сравнения результатов, полученных при обычном магнитно-импульсном прессовании и в ударно-волновом режиме при одинаковой запасенной энергии, что не позволяет оценить перспективность применения ударно-волнового режима прессования.

**Апробация.** Работа широко обсуждалась на большом количестве семинаров, российских и международных научных конференциях.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 39 печатных научных работах, в том числе 21 статья в рецензируемых научных журналах. Все положения, выносимые на защиту, опубликованы в рецензируемых изданиях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

**Общее заключение.** Отмеченные недостатки работы, не снижают научную и практическую ценность работы. В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями в физике гетерогенных наноматериалов, позволяющие их квалифицировать как новое крупное достижение в области создания новых материалов на основе электрофизических методов. На основании изложенного можно заключить, что диссертационная работа «Особенности механических свойств наноразмерных порошков и их влияние на процессы магнитно-импульсного компактирования» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Данная работа удовлетворяет требованиям к докторским диссертациям, установленным в п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Болтачев Грэй Шамильевич, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – физика конденсированного состояния и 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент

Ученая степень: доктор физ.-мат. наук

Номер специальности: 01.04.02 – теоретическая физика, 01.04.13 – электрофизика.

Ученое звание: профессор по кафедре теоретической физики.

Должность: профессор кафедры общей и теоретической физики Южно-Уральского государственного университета ФГБОУ ВПО "ЮУрГУ" (НИУ) (454080 Челябинск, Россия., проспект Ленина 76)

Дата: 29.04.2014

e-mail: yalovets.alex@rambler.ru

*А. Яловец*

Яловец Александр Павлович



ВЕРНО  
Начальник службы  
делопроизводства ЮУрГУ  
Н.Е. Цаулина

*Цаулина*