

На правах рукописи

УДК 669:621.762:621.7

Гашии Сергей Владимирович

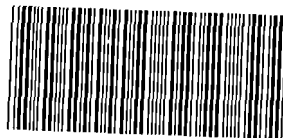
**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
ЗАГОТОВОК ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ
АЛЮМИНИЙ-РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ**

Специальности:

05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы
05.16.05 – обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



005534137

3 ОКТ 2013

Санкт-Петербург-2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научные руководители:

Цеменко Валерий Николаевич
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Золотов Александр Максимович
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Мертенс Карл Карлович
доктор технических наук,
профессор кафедры машин и технологии
обработки металлов давлением СПбГПУ

Шаболдо Олег Павлович
кандидат технических наук,
начальник лаборатории отдела 123
ОАО «Центральный научно-
исследовательский институт материалов»

Ведущая организация:

ЗАО «Завод «Композит»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «24» октября 2013 г. в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «20» сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.03,
кандидат технических наук



Климова О.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Методы порошковой металлургии находят широкое применение при получении изделий со специальными свойствами для различных отраслей промышленности, в том числе для ядерной энергетики. В настоящее время одной из актуальных задач этой отрасли является транспортировка и захоронение радиоактивных отходов, для чего необходимы легкие и прочные контейнеры из материалов с высоким уровнем поглощения нейтронного излучения.

Снижение массы контейнера без ухудшения его технологических характеристик, увеличение коэффициента полезной загрузки, стабилизация теплового режима и повышение параметров поглощения излучения – все эти требования могут быть реализованы за счет применения новых материалов на основе алюминия с добавками смесей редкоземельных элементов (РЗЭ) или их оксидов. Такие материалы могут быть получены методом механического легирования (МЛ). Метод МЛ – один из методов порошковой металлургии, позволяющий получать дисперсно-упрочненные и композиционные материалы. Благодаря этому методу можно добиться увеличения растворимости легирующих добавок в материале матрицы и осуществить синтез равновесных и метастабильных кристаллических, а также аморфных фаз.

Каким бы ни был состав сплава, и, тем более, для дисперсноупрочненных материалов, преимущества метода МЛ проявляются в полной мере только в том случае, когда последующая технология компактирования и термической обработки тщательно проработаны и хорошо отлажены. Следует отметить, что статическое компактирование порошков, содержащих интерметаллиды высокой твердости, связано с определенными трудностями и проблемами. Перспективными для уплотнения подобных материалов считаются методы интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности метод равноканального углового прессования (РКУП).

Особенностью процессов РКУ прессования является совмещение воздействия на заготовку повышенного гидростатического давления и больших сдвиговых деформаций в переходной зоне канала. Это позволяет в процессе компактирования порошковых заготовок при увеличении площади контакта между частицами разрушать оксидные пленки с образованием новых ювенильных поверхностей, которые способствуют схватыванию порошков.

На сегодняшний день актуальной проблемой является практическая реализация технологического процесса РКУП механически легированных порошков на основе алюминия. Анализ особенностей формообразования порошковых заготовок при РКУП практически отсутствует. Остаются малоизученными характер течения реального материала в канале, особенности напряженно-деформированного состояния материала, условия контактного трения. Решение этих проблем позволит сформулировать требования к формообразующему инструменту и рекомендации для практической реализации технологического процесса РКУП порошковых заготовок.

Цель работы: разработка практических рекомендаций для получения заготовок из композиционного материала с особыми радиационно-защитными свойствами на основе механически легированных порошков системы алюминий-редкоземельные металлы с использованием методов интенсивной пластической деформации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ влияния режимов процесса механического легирования на микроструктуру, дисперсность и однородность распределения структурных элементов в порошковых композициях системы алюминий-редкоземельные металлы; определение состава порошковой композиции, пригодной для получения компактной заготовки в процессе уплотнения.
2. Физическое моделирование процессов уплотнения и пластического деформирования для определения реологических характеристик порошковой композиции. Математическое моделирование процесса РКУП заготовок из композиционных порошковых материалов в капсуле; выбор схемы и технологических режимов деформации, позволяющих обеспечить рациональное сочетание уплотнения и пластического сдвига, для улучшения компактирования малопластичного порошкового материала.
3. Проектирование рабочего инструмента и практическая реализация процесса РКУП. Исследование геометрических и энергосиловых характеристик процесса уплотнения и деформации порошковой заготовки в канале матрицы и особенностей формирования структуры материала.
4. Разработка практических рекомендаций по осуществлению технологического процесса получения заготовок из композиционного материала с особыми радиационно-защитными свойствами на основе механически легированных порошков системы алюминий-редкоземельные металлы с использованием методов интенсивной пластической деформации.

Научная новизна

1. Изучено влияние длительности процесса механического легирования на структуру композиционного материала системы Al+PЗМ с различным соотношением компонентов. Показано, что однородность структуры частиц сферической формы требуемого гранулометрического состава обеспечивается в композиции Al+15% PЗМ (масс.) при продолжительности процесса 100 часов. Увеличение времени легирования приводит к избыточному упрочнению сферических частиц и их дроблению, что снижает технологические характеристики порошкового материала в целом.
2. Методами физического моделирования и рентгенофазового анализа определена температура термической обработки, при которой снижается деформационное упрочнение матричного материала (Al) и повышается пластичность частиц порошка без образования новых интерметаллидных фаз в структуре механически легированного композиционного материала Al+15% PЗМ.
3. Разработана методика определения реологических характеристик порошковых материалов при повышенных температурах, основанная на методах физического моделирования различных схем нагружения порошковых заготовок. Определены зависимости параметров эллиптического условия текучести от плотности в интервале рабочих температур, позволяющих рационально осуществить процесс уплотнения композиционного материала Al+15% PЗМ при РКУП.

4. С использованием математического моделирования исследовано влияние основных технологических параметров процесса РКУП на напряженно-деформированное состояние материала заготовки. Установлено, что течение материала в сужающемся канале сокращает зону растягивающих напряжений, прилегающую к верхней стенке канала, и повышает гидростатическую составляющую сжатия за счет возрастающего противодавления прессования.

5. Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что применение РКУ-прессования порошкового материала в оболочке позволяет за счет рационального сочетания уплотнения и пластического сдвига получить заготовку, деформируемость которой при последующей прокатке значительно выше по сравнению с заготовкой, полученной без предварительного РКУП.

6. На основе математического моделирования и экспериментальной прокатки изучен характер течения заготовки из композиционного материала Al+15% PЗМ в оболочке при горячей прокатке. Определены условия, позволяющие осуществить совместную деформацию слоистого материала с сохранением целостности менее пластичной композиционной сердцевины.

Практическая значимость

1. Разработаны практические рекомендации для получения заготовок из композиционного материала с особыми радиационно-защитными свойствами на основе механически легированных порошков системы алюминий-редкоземельные металлы. В результате проведенного комплекса исследований получены заготовки из композиционного материала Al+15% PЗМ в алюминиевой оболочке, который как радиационно-защитный материал может быть практически использован в производстве контейнеров различных типов и конструкций для утилизации радиактивных отходов.

2. Установлены основные параметры технологического процесса изготовления компактных заготовок, включающего РКУП порошкового композиционного материала Al+15% PЗМ в оболочке, последующую горячую и холодную прокатку композиционных лент. Определены механические характеристики композиционных лент, которые позволяют оценить возможность их использования в различных технологических переделах.

3. На основе математического моделирования разработана, спроектирована и изготовлена оснастка для практической реализации процесса РКУП, обеспечивающая широкий диапазон изменения технологических параметров процесса в сочетании с высокой жесткостью конструкции.

Результаты работы используются в магистерских образовательных программах по направлению 150100.68.04 «Порошковые и композиционные материалы».

Методы исследования

В работе применялись следующие методы исследования: компьютерное моделирование процессов пластической обработки пористых и порошковых материалов методом конечных элементов, физическое моделирование процессов уплотнения порошковых материалов на комплексе *Gleeble-3800*, экспериментальное исследование с применением современных средств измерений, оптической и электронной микроскопии, компьютерная обработка результатов эксперимента.

Апробация работы

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях: Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. XXXIV неделя науки СПбГПУ. СПб. 2006г; VII международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии и их использование в технике». СПб. 2006; Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». СПб. 2007; Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии.». СПб. 2009г; Третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 2009г; Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов». СПб. 2010г; Второй международной конференции «Павловские чтения». Москва 2010г; Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». СПб. 2011г; Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов». СПб. 2012г; Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». СПб. 2013г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 4 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, списка литературы из 106 наименований. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 90 рисунков, 13 таблиц, 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований. Отражены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен литературно-аналитический обзор, рассмотрены преимущества и особенности метода механического легирования, выполнен анализ методов компактирования механически легированных порошковых материалов, проведено исследование возможностей применения метода равноканального углового прессования для компактирования порошковых материалов.

Механическое легирование позволяет создавать композиции на основе алюминия с большим содержанием редкоземельных элементов. Такие материалы, наряду с высокой поглощающей способностью тепловых нейтронов, обладают повышенной теплопроводностью и пониженной массой, что делает их перспективными для атомной индустрии. Наряду с ярко выраженными преимуществами полученные таким методом материалы имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что сложная, наклепанная микроструктура с большим содержанием упрочняющей фазы, не поддается компактированию традиционными методами порошковой металлургии.

Перспективным способом уплотнения подобных труднодеформируемых материалов является применение в технологии их компактирования методов ИПД,

позволяющих совместить в очаге деформации большое гидростатическое давление со сдвиговыми деформациями, что является оптимальной схемой для уплотнения сложных порошковых композиций, содержащих оксиды и интерметаллиды. Наибольшую популярность среди методов ИПД имеет равноканальное угловое прессование – метод, позволяющий получить практически равномерные по сечению образца сдвиговые деформации, а следовательно, и однородную конечную структуру.

РКУП является сложным технологическим процессом и его применение дает положительный результат только в том случае, когда все технологические параметры заранее найдены и обоснованы. В частности, РКУП порошковых материалов может приводить к разрыхлению и расслоению порошковой заготовки, связанному с возникновением зон растягивающих напряжений на краях и в зоне выхода из очага деформации. Поэтому для прессования подобных материалов необходимо заранее выполнить расчет схемы напряженно-деформированного состояния на всех стадиях деформирования образца и удостовериться в отсутствии зон растягивающих напряжений.

Из анализа литературы следует, что значительную роль в процессе уплотнения играют такие факторы, как геометрия инструмента, наличие противодавления и оболочки для порошкового материала. Учесть все факторы, влияющие на процесс, и провести правильный анализ позволяет использование методов математического моделирования, в частности метод конечных элементов. Однако построение математической модели требует однозначного и грамотного задания реологических характеристик исследуемого материала. Математическое моделирование позволяет не только описать и проанализировать процесс деформирования порошковой заготовки, но и помогает сформулировать технологические рекомендации для процесса проектирования инструмента и практической реализации процесса.

Кроме того, большинство литературных источников ограничиваются только исследованием структуры и свойств материала непосредственно после процесса РКУП и полностью отсутствуют данные о технологиях последующей обработки полученных заготовок.

В связи с этим, необходимо разработать практические рекомендации для получения заготовок из композиционного материала с особыми радиационно-защитными свойствами на основе механически легированных порошков системы алюминий-редкоземельные металлы с использованием методов математического и физического моделирования процессов деформации.

Вторая глава посвящена анализу влияния режимов процесса механического легирования на микроструктуру, дисперсность и однородность распределения структурных элементов в порошковых композициях системы алюминий-редкоземельные металлы с целью определения состава порошковой композиции, пригодной для получения компактной заготовки в процессе уплотнения.

Институтом химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН был предоставлен целый ряд механически легированных порошковых композиций на основе алюминия и смеси редкоземельных элементов. В процессе получения варьировали: состав легирующей смеси (бескремниевая комплексная лигатура АКЦ или смесь оксидов РЗЭ), содержание легирующих компонентов (5%,

10%, 15%, 20%, 25%), время протекания процесса в шаровых мельницах (50, 100, 200, 400 часов).

После механического легирования частицы порошка представляют собой сложный композиционный материал (рис. 1), в процессе получения которых происходит дисперсное и деформационное упрочнение, образование новых оксидных и интерметаллидных фаз. Прочностные характеристики материала, однородность распределения частиц по размерам, форме и распределению структурных составляющих зависят не только от соотношения исходных компонентов, но и от энергосиловых параметров размольного оборудования и наличия в системе активирующих элементов (ПАВ), смещающих равновесие системы. Критериями оценки полноты протекания процесса механического легирования в данной работе являлись: получение однородной микроструктуры, заданного гранулометрического состава и сравнительно невысокого уровня микротвердости, что в комплексе создаст благоприятные условия для компактирования данного материала.

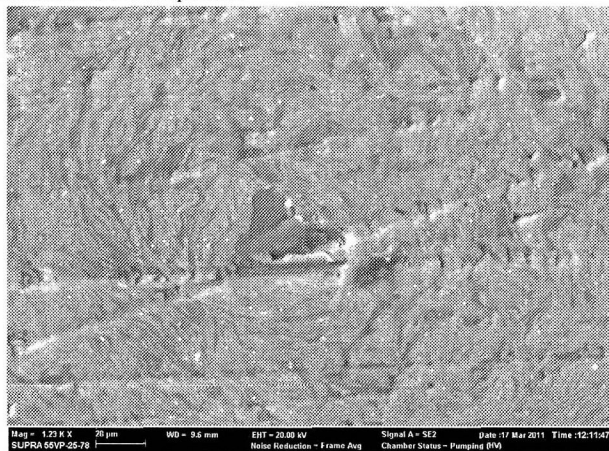


Рис. 1. Микроструктура механически легированного порошка. x1230

В работе исследовано влияние термической обработки на изменение технологических свойств механически легированных порошковых материалов. Рентгенофазовый анализ показывает изменение фазового состава после термической обработки материала: до процесса термической обработки на рентгенограмме четко разделялись пики, характерные для матричного материала и для легирующей композиции (рис. 2). Это свидетельствует о том, что в процессе механического легирования происходило только дисперсное упрочнение и наклеп. При отжиге, наряду с процессом снятия внутренних напряжений, происходил процесс образования новых интерметаллидных фаз, таких как: Al_3Ni_2Ce и Al_3Ni_2Pr , Al_4Ce , Al_3Ni , $HoNi$ и Ni_2Y (рис. 3).

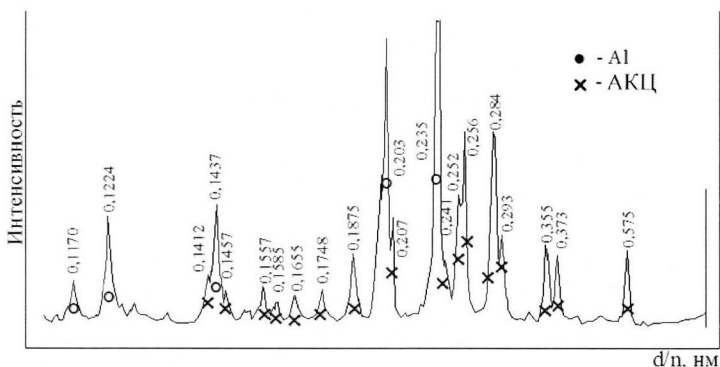


Рис. 2. Дифрактограмма порошка Al-P3Э до термической обработки

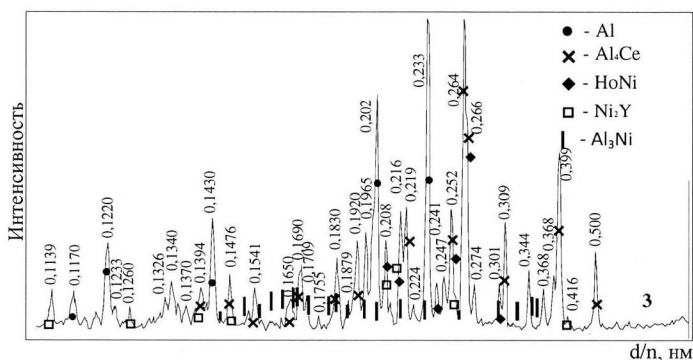


Рис. 3. Дифрактограмма порошка Al - P3Э после отжига при 550°C

Наличие обнаруженных фаз может отрицательно сказаться как на процессе уплотнения, так и на последующей деформации исследуемого материала, поэтому в работе определен температурный интервал деформирования порошков, при котором не протекают фазовые превращения.

Компактирование механически легированных порошковых материалов показало, что оксидные пленки и интерметаллидные фазы препятствуют образованию достаточно прочных связей между частицами, оказывая высокое сопротивление пластическому деформированию материала частиц в процессе их уплотнения. Образующиеся при спекании таких материалов связи на границе раздела между частицами являются хрупкими. Вероятно, такая связь образована не металлом, а его оксидной пленкой.

По результатам исследования микроструктуры, формы частиц, уплотняемости, микротвердости и гранулометрического состава установлено, что наиболее пригодной для компактирования из предложенных материалов является

композиция Al+15% PЗЭ, легированная в течение 100 часов. Такое содержание смеси легирующих компонентов обеспечивает достаточно высокий уровень поглощающей способности и дисперсного упрочнения полученного композита. Время легирования обеспечивает, с одной стороны, получение однородной слоистой микроструктуры порошка, а с другой стороны, позволяет получить частицы сферической формы заданного гранулометрического состава. Уменьшение времени легирования отрицательно влияет на однородность, а увеличение – приводит к росту микротвердости и образованию оскольчатых частиц, плохо поддающихся компактированию. Установлено, что смесь оксидов PЗЭ в большей степени упрочняет частицы порошка по сравнению с чистыми редкоземельными металлами из лигатуры АКЦ, поэтому для процесса уплотнения целесообразно использовать порошковые материалы системы Al+PЗЭ из АКЦ.

Применение различных оболочек с целью получения более благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния положительно влияет на процесс компактирования, обеспечивая дополнительные сжимающие напряжения. Экспериментально установлено, что компактирование заготовок в интервале температур от 20 до 550°C не приводит к образованию связей между частицами, образцы невозможно подвергнуть дополнительной пластической деформации, разрушение образцов носит хрупкий характер. Для компактирования исследуемого материала целесообразно применение методов ИПД.

Третья глава посвящена математическому моделированию процесса равноканального углового прессования порошковых материалов с целью выбора схемы и технологических режимов деформации, позволяющих обеспечить рациональное сочетание уплотнения за счет гидростатического сжатия и простого сдвига.

При математическом моделировании процессов уплотнения порошковых материалов при повышенных температурах порошковый материал представляется обычно как спеченный с уже образовавшимися связями между частицами порошка.

В случае с механически легированными материалами образование оксидных пленок и интерметаллидной фазы может препятствовать образованию связей между частицами.

Для описания поведения такого материала следует прибегнуть к математическому описанию порошковой среды как неспеченного порошкового тела, при этом необходимо учесть изменение механических характеристик при повышении температуры. Такой модели порошковой среды соответствует эллиптическое условие текучести (рис. 4).

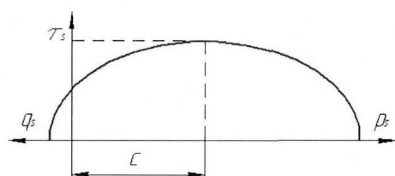


Рис.4. Эллиптическое условие текучести порошкового материала.

Для корректного описания процессов деформирования порошковых материалов принципиальное значение имеет та часть кривой предельного состояния, которая относится к области уплотнения. Эта часть определяется точками одноосного сжатия, сжатия в закрытой матрице и гидростатического сжатия. Таким образом, для построения реологической модели материала требуется построить зависимость трех параметров от пористости материала: p_s – предела текучести при гидростатическом сжатии; τ_s – предела текучести при пластическом сдвиге; c – предела уплотнения.

Для труднодеформируемых материалов нахождение реологических характеристик аналитическим путем является сложной задачей из-за большого количества входных параметров. В данном случае, единственным путем решения задачи является физическое моделирование процесса деформирования исследуемого материала.

Физическое моделирование процесса уплотнения производилось на комплексе *Gleeble-3800*. Для реализации процесса горячего уплотнения в закрытой матрице была изготовлена специальная оснастка (рис. 5). Нагрев образца осуществлялся прямым пропусканием тока через зажимы.

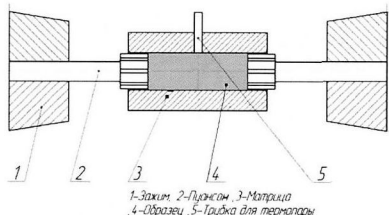


Рис. 5. Оснастка для деформации образцов на комплексе *Gleeble-3800*

После достижения в камере высокого вакуума задавалось давление. После этого образец нагревался электрическим током со скоростью нагрева $0,5^\circ\text{C}/\text{с}$ в интервале температур от 20 до 580°C . При повышении температуры происходит повышение пластичности порошкового материала и под действием приложенной нагрузки он начинает уплотняться. На рис. 6 приведена зависимость плотности образца от температуры прессования при заданном постоянном давлении 68МПа . Необходимо отметить, что линия графика имеет перегибы около точек 340°C и 420°C . Установлено, что интервал между ними является зоной фазовых превращений. На основании данного факта была рекомендована температура

пластической деформации 300°C , при которой не происходит образования интерметаллидных фаз и интенсивного окисления.

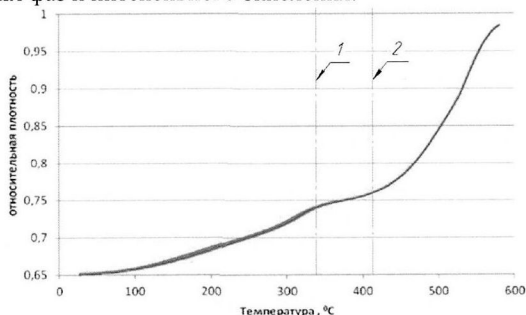


Рис. 6. Зависимость относительной плотности порошкового материала от температуры прессования
1,2 – предполагаемые границы выделения интерметаллидных фаз

Испытания образцов на одноосное сжатие проводили на универсальной машине Р-10 при температурах 20 и 300°C . Для испытания образцов при температуре 300°C оснастка вместе с образцом (рис. 7) помещалась в камерную печь, нагревалась до 300°C и выдерживалась при этой температуре в течение 30 мин. После этого оснастка помещалась в рабочую зону машины и производилось нагружение образца. Критерием разрушения образца считалось достижение деформации 1%.

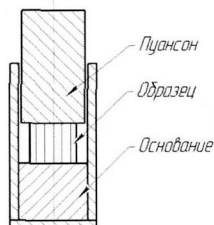


Рис.7. Схема приспособления для испытания на одноосное сжатие

На рис. 8 приведены экспериментально определенные значения механических характеристик при температурах 20 и 300°C , необходимые для построения реологических уравнений. Значения реологических характеристик, как следует из графических зависимостей, при повышении температуры до 300°C снижаются почти в 2 раза.

Для оценки возможностей применения РКУП для компактирования порошковых материалов был проведен предварительный анализ процесса с использованием математического моделирования с применением программного пакета *Multidef*, разработанного на кафедре «Пластическая обработка металлов» СПбГПУ под руководством проф. Рыбина Ю.И.

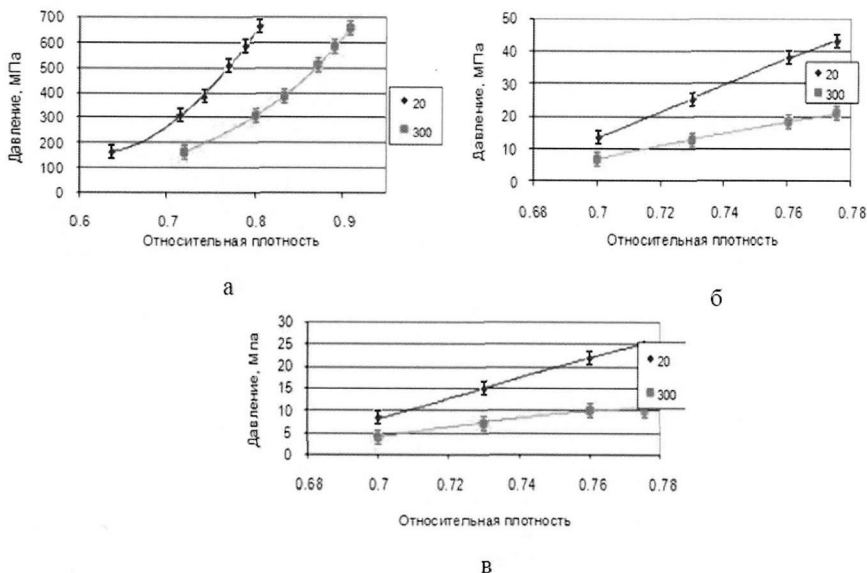


Рис. 8. Зависимости реологических характеристик от плотности материала при температурах 20 и 300°C: а – предела текучести при гидростатическом сжатии (p_s); б – предела текучести при пластическом сдвиге (τ_s); в – предела уплотнения (c)

На первом этапе проводилось моделирование процесса РКУП сплошной алюминиевой заготовки для канала, имеющего один поворот и следующую геометрию: угол пересечения входной и выходной частей канала $\Phi=105^\circ$, внешний радиус сопряжения $R=10\text{мм}$, внутренний радиус сопряжения $r=5\text{мм}$, ширина прямолинейных участков $b=20\text{мм}$ (рис.9а).

На рис. 9б представлен характер распределения интенсивности накопленной деформации заготовки в продольной плоскости канала после одного прохода.

Из представленных результатов следует, что в передней части заготовки распределение накопленных деформаций носит неравномерный характер и их величина незначительна. Только на расстоянии, равном поперечному размеру заготовки от переднего торца, поле распределения накопленных деформаций стабилизируется и характеризуется относительной равномерностью в поперечном сечении. Характер этого распределения в значительной степени зависит от геометрии канала и условий трения на контактной поверхности.

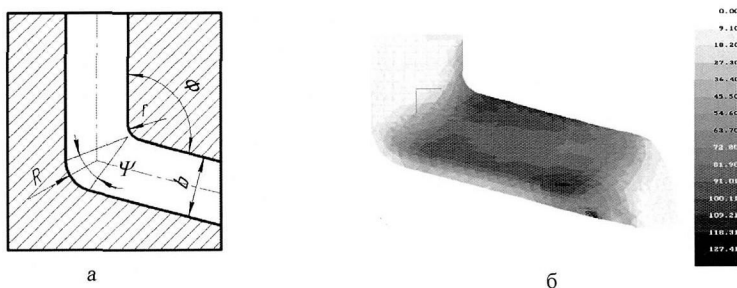


Рис. 9. Схема канала матрицы и распределение интенсивности накопленных деформаций в продольном сечении заготовки после однократного деформирования РКУП

Реализация этого процесса возможна только при использовании противодействия со стороны выходного канала, а также создания условий снижения коэффициента трения на контактной поверхности. В противном случае, возможно образование застойных зон.

Уменьшить зону положительных значений растягивающих напряжений в переходной части канала возможно путем его незначительного сужения на выходе (порядка 1°). При этом, как видно из рис. 10, значительно расширяется зона отрицательных значений σ_0 (в переходной зоне канала) и уменьшается зона положительных значений.

Полученные результаты предварительного анализа позволили сделать вывод о целесообразности применения для компактирования порошковых материалов методом РКУП специальных капсул, которые предохраняют прессуемый порошок от негативных внешних воздействий, в первую очередь, от растягивающих напряжений по верхней стенке канала.

На втором этапе математического моделирования проведен анализ процессов компактирования порошков в капсулах при РКУП. На рис. 11а представлена сетка конечных элементов порошковой заготовки в капсуле в исходном состоянии. Геометрия и размеры капсулы были определены на основании предварительных исследований, проведенных ранее на кафедре «Пластическая обработка металлов».

Результаты моделирования позволили установить, что при недостаточном подпоре со стороны выходного канала заготовка начинает терять устойчивость, происходит ее изгиб в месте начала контейнера с порошком (рис. 11б). Следовательно, практическая реализация процесса прессования без создания противодействия со стороны выходного канала на начальных этапах процесса затруднительна.

Для создания противодействия при прессовании было предложено в начале задавать в вертикальный канал матрицы компактную заготовку из материала капсулы, а после ее деформирования во входной канал вставлять и нагружать капсулу с порошком.

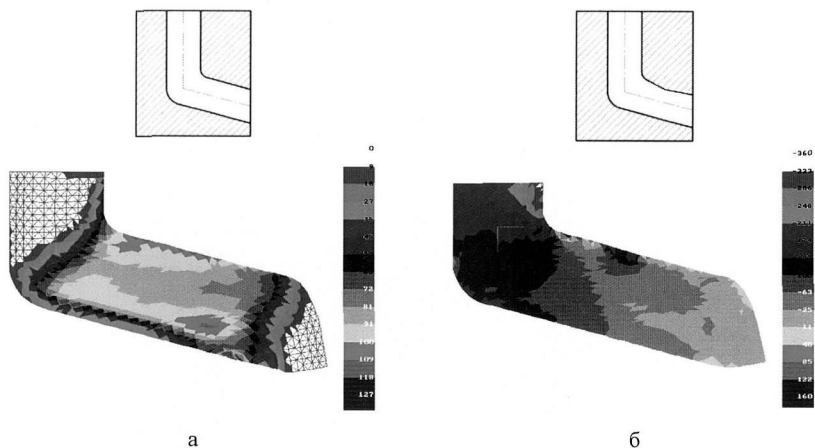


Рис. 10. Распределение σ_0 в заготовке в зависимости от геометрии выходного канала, а- без сужения, б- с частичным сужением канала (красный цвет- положительные значения)

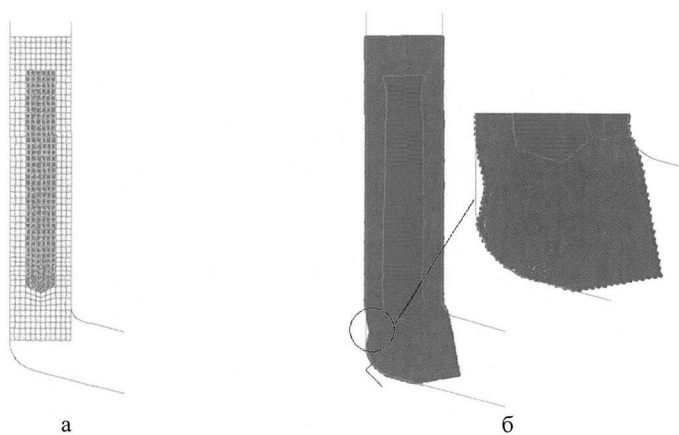


Рис. 11. Математическое моделирование РКУП порошковых заготовок в капсулах: а – сетка конечных элементов; б - изгиб заготовки при осадке в вертикальном канале

На первой стадии прессования с подпором со стороны выходного канала вследствие деформации капсулы происходит уплотнение порошкового материала (рис.12а). По мере увеличения плотности характер неравномерности распределения пористости по высоте сохраняется аналогично прессованию порошка в замкнутой матрице, при этом в целом увеличивается сопротивление деформации заготовки. При достижении некоторого критического значения давления начинается совместное перемещение компактной заготовки и капсулы с порошком (рис. 12б). После прохождения донной части капсулы через зону высоких сдвиговых

деформаций уплотнение пористой части заготовки в матрице осуществляется за счет эффекта дилатансии. При этом пористая часть заготовки в капсуле уплотняется значительно более интенсивно по сравнению с первым этапом формообразования - воздействием гидростатического давления (рис. 12в). В дальнейшем процесс выходит на стационарную стадию деформирования.

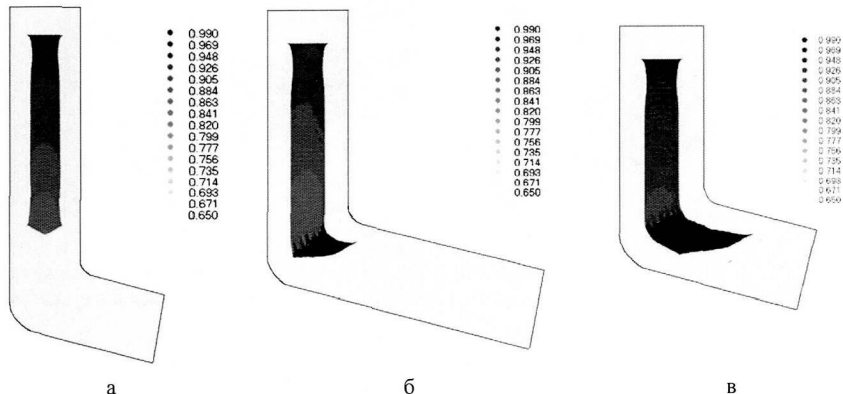


Рис.12. Распределение плотности в порошковой части заготовки:

а – во входном канале, б – при выходе из очага деформации, в – в установившейся стадии процесса

Таким образом, на основании математического моделирования выбраны геометрические параметры инструмента для проведения РКУП. Установлено, что для изменения схемы напряженно-деформированного состояния в носовой части заготовки необходимо увеличение противодействия за счет продавливания перед порошковым образцом заготовки из материала оболочки и сужение выходного канала. Влияние растягивающих напряжений в боковых кромках порошкового материала устранено при его прессовании в контейнере с толщиной стенки не менее $\frac{1}{4}$ от толщины заготовки.

Полученные результаты явились основой для проектирования оснастки для РКУП и практической реализации процесса получения заготовок из порошкового материала Al+15% PЗЭ в капсуле.

В четвертой главе осуществлена практическая реализация процесса получения заготовок, включающая равноканальное угловое прессование порошкового материала в капсуле и последующую прокатку слоистого композиционного материала.

Для реализации процесса РКУП спроектирован инструмент, основными элементами которого являлись две прижимные плиты (Г) с направляющими и внутренние вставки (Б, В) (рис.13).

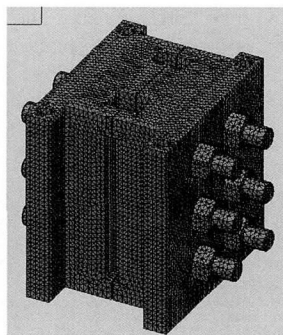
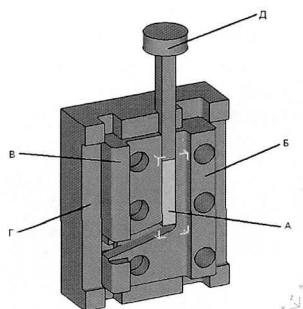


Рис.13. Схема оснастки и ее упрощенная конечно-элементная модель

Математическое моделирование процесса РКУП показало, что максимальное усилие при прессовании алюминиевых заготовок в разработанной оснастке может достигать 200кН, что соответствует распорному усилию в канале, равному 900кН. При данных условиях возможно образование зазора между вставками и прижимными плитами, в который может затекать часть материала деформируемого образца. Образующийся при этом заусенец приводит к резкому увеличению усилия прессования и заклиниванию пуансона.

Моделирование условий работы инструмента проводилось с применением программного пакета SolidWorks, в частности, с помощью модуля COSMOSWorks — программного обеспечения для расчета на статическую прочность и устойчивость различных конструкций.

После проведения компьютерного моделирования были построены поля распределения перемещений, и напряжений в отдельных частях оснастки. Полученные данные позволили внести коррективы в конструкцию оснастки перед ее изготовлением.

После определения основных технологических параметров и изготовления инструмента был проведен натурный эксперимент. Капсула из алюминия марки А7 с порошковым материалом с плотностью 72% нагревалась в электропечи до температуры 300°С и выдерживалась 1 час. Оснастка для равноканального углового прессования, подогревалась перед экспериментом в течение 4-5 часов с помощью гибкого нагревательного элемента, помещенного в канал, после чего в вертикальный канал помещалась нагретая капсула и подвергалась деформированию.

С целью исследования распределения пористости на различных этапах РКУП прессование последней из серии заготовки прерывалось на этапе прохождения очага деформации серединой заготовки. На рис. 14а показан общий вид такой заготовки. На рис. 14б представлена микроструктура порошковой части образца, находящаяся в вертикальном канале. За счет сжимающих напряжений образец уплотнился с относительной плотности 0,72 до плотности 0,91. Рис. 14в соответствует очагу деформации, в котором за счет больших сдвиговых деформаций и проявления эффекта дилатансии образец доуплотнился до относительной плотности 0,94. При этом отчетливо видно появление поверхностей

«схватывания» отдельных частиц порошкового материала вследствие их деформации и разрушения оксидных пленок. Дальнейшее доуплотнение материала после выхода из очага деформации приводит к уплотнению до относительной плотности 0,98 (рис. 14г) Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются как качественно, так и количественно с результатами моделирования процесса (рис. 12).

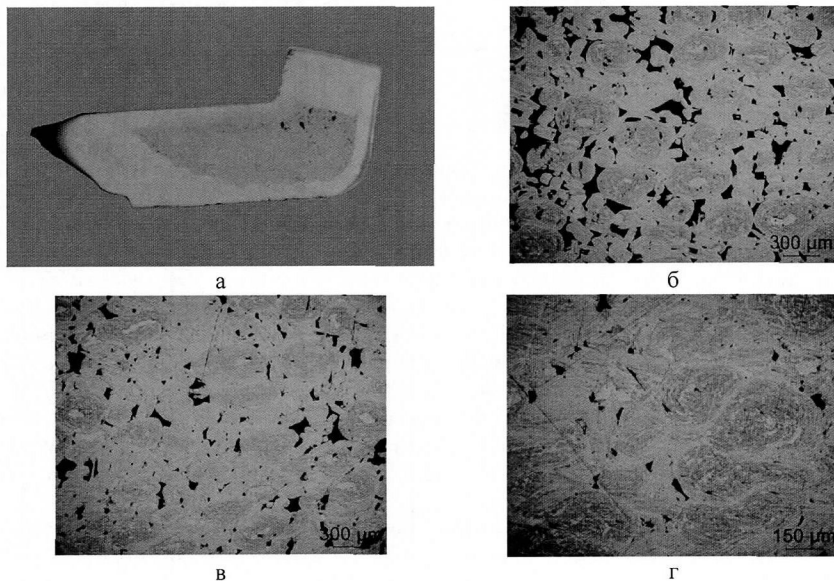


Рис. 14. Общий вид заготовки и микроструктура порошковой части образца на различных стадиях деформации

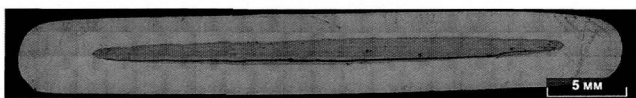


Рис. 15. Макроструктура образца после РКУП и горячей прокатки

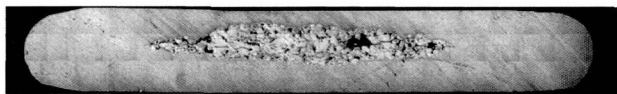


Рис. 16. Макроструктура образца после горячей прокатки без РКУП

Последующая горячая пластическая деформация осуществлялась прокаткой при температуре 300°C в несколько проходов с суммарной относительной деформацией 0,9. Прокатка доуплотняет полученный материал практически до беспористого состояния (рис. 15). В отличие от горячей прокатки порошка в

капсуле без предварительного РКУП, материал, подвергнутый РКУП и прокатке, имеет значительно более однородную структуру без остаточной пористости (рис. 15 – 16).

Анализ напряженно-деформированного состояния и пластического течения слоистой композиционной заготовки при горячей прокатке осуществлен с использованием математического моделирования в пакете *Deform-3D*.

Для решения задачи использовали следующие положения: модель деформируемых материалов – жестко-пластическая среда с упрочнением, свойства которой заданы кривыми пластического течения материала при различных температурах и скоростях деформации. На основе экстраполяции экспериментальной зависимости предела текучести при пластическом сдвиге (τ_s) от относительной плотности (рис. 8) выбран беспористый модельный материал с аналогичными реологическими характеристиками. Модель деформирующего инструмента создана на основе геометрических параметров лабораторного прокатного стана 210 (рис. 17). Коэффициент трения между валками и прокатываемым материалом принимали равным 0,4.

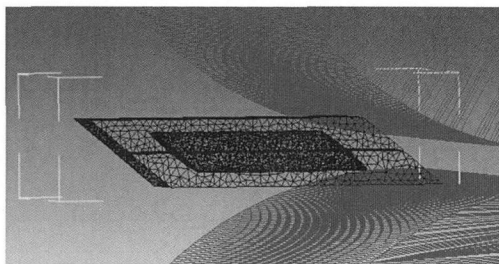


Рис.17. Сетка конечных элементов для решения задачи прокатки композиционной заготовки

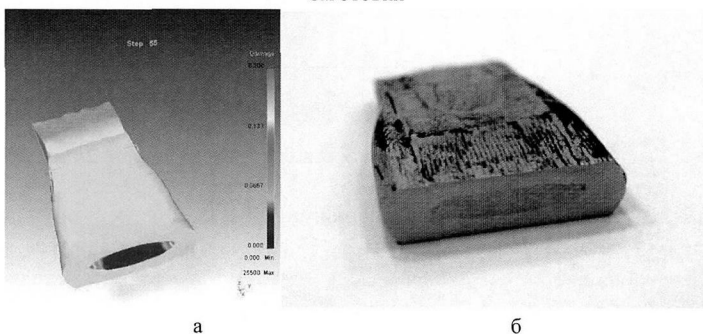


Рис. 18. Носовая часть прокатанной заготовки:
а – результат математического моделирования
б – результат опытной прокатки

По результатам опытной прокатки установлено предельное обжатие (60%), при котором происходит разрушение центральной (композиционной) части слоистой заготовки. Это позволило оценить предельную величину критерия разрушения Кокрофта-Латама для деформации слоистого материала, математически смоделировать и опробовать неразрушающие режимы многопроходной горячей деформации композиционного материала при сложной геометрии контейнера, а также установить характер течения слоистого материала при различных обжатиях. На рис.18а показано сечение заготовки после деформации 50%, смоделированное в пакете *Deform-3D*, а на рис. 18б показано сечение заготовки, полученной экспериментально при таких же степенях деформации. Разработанная модель достаточно точно воспроизводит реальное поведение слоистой заготовки в процессе ее деформации и может быть использована при проектировании технологического процесса горячей прокатки слоистой заготовки с различной геометрией композиционной сердцевины.

В работе дана оценка механических свойств полученного слоистого композиционного материала. Испытания образцов, представляющих собой пластины 100x200мм и толщиной 2 мм, проведено на разрывной машине *Zwick/Roell Z050*.

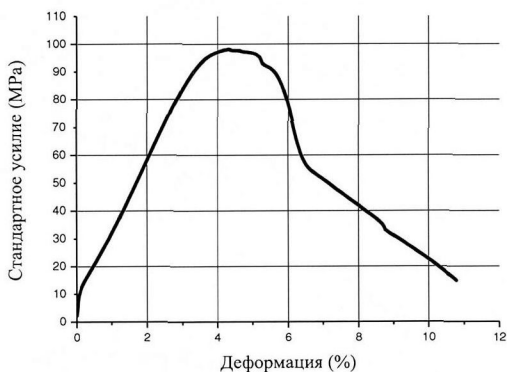


Рис. 19. Диаграмма растяжения образца толщиной 2мм.

Как следует из рис. 19, до деформации 4% идет совместное растяжение композиционного материала с оболочкой. После достижения предела прочности заготовки наблюдается плавный спад нагрузки, что свидетельствует о пластической деформации оболочки после разрушения центральной композиционной части.

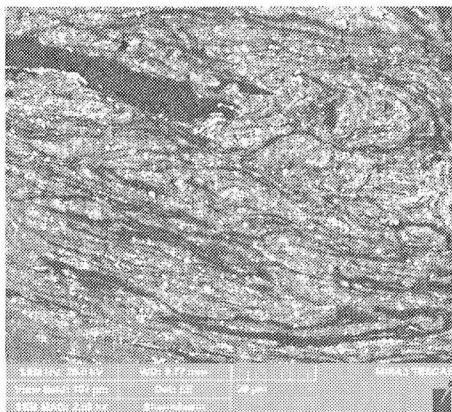


Рис. 20. Структура сердцевины компактированного материала после пастической обработки

Анализ микроструктуры полученного композиционного материала с радиационно-защитными свойствами указывает на сохранение его исходной, однородной структуры (рис. 20). Таким образом, применение РКУП с последующей прокаткой позволило получить композиционный материал, структура которого соответствует структуре частиц порошка $Al+15\% \text{ PЗЭ}$, полученных методом механического легирования.

В приложениях 1 – 4 приведены экспериментальные данные исследований и статистической обработки основных технологических характеристик исследуемых порошковых композиций. Прочностные расчеты спроектированной оснастки для проведения РКУП приведены в **приложении 5**.

Основные выводы по работе

1. Разработаны практические рекомендации по осуществлению технологического процесса получения заготовок из композиционного материала с особыми радиационно-защитными свойствами на основе механически легированных порошков системы алюминий–редкоземельные металлы. Показано положительное влияние применения контейнера при РКУП; определен температурный интервал, в котором возможно компактирование и последующая пластическая обработка заготовки; определены технологические параметры прокатки, позволяющие осуществить совместную деформацию слоистого материала с сохранением целостности менее пластичной композиционной сердцевины.

2. Из результатов исследования микроструктуры, формы частиц, уплотняемости, микротвердости и гранулометрического состава следует, что наиболее пригодной для компактирования является композиция $Al+15\% \text{ PЗЭ}$, легированная в течение 100 часов. Такое содержание смеси легирующих

компонентов обеспечивает достаточно высокий уровень поглощающей способности полученного композита. Время легирования обеспечивает, с одной стороны, получение однородной слоистой микроструктуры порошка, а с другой стороны, позволяет получить сферические частицы заданного гранулометрического состава. Уменьшение времени легирования отрицательно влияет на однородность, а увеличение - приводит к росту микротвердости и образованию оскольчатых частиц, плохо поддающихся компактированию.

3. На основе физического моделирования разработана методика получения реологических характеристик механически-легированных порошковых композиций при различных температурах на комплексе *Gleeble-3800*. Построены зависимости реологических характеристик от плотности материала при температурах 20 и 300°C, которые использованы при математическом моделировании процессов деформирования заготовок РКУП и прокаткой.

4. Методом математического моделирования определен характер течения порошкового материала в капсулах в процессе РКУП. Установлено, что на первом этапе РКУП происходит осадка оболочки и уплотнение порошкового материала в вертикальном канале, второму этапу характерно доуплотнение материала за счет интенсивного сдвига в очаге деформации. На третьем этапе происходит выход процесса на стационарную стадию без изменения плотности порошкового материала.

5. На основе данных математического моделирования разработан и спроектирован инструмент для проведения равноканального углового прессования. С использованием прикладных программ экспресс анализа прочности конструкции проведен оценочный расчет сложной технологической оснастки для деформации порошковых материалов.

6. Методами математического моделирования определен характер течения скомпактированного материала в прокатных валках при различных обжатиях. Сравнением численного и натурального экспериментов определена предельная величина критерия разрушения Кокрофта-Латама при совместном деформировании материалов оболочки и труднодеформируемой композиционной сердцевины. Установлены неразрушающие режимы многопроходной горячей деформации слоистого композиционного материала.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. С.А. Котов, В.Д. Андреева, С.В. Ганин, Б.М. Фрейдin, Ю.В. Кузьмич Влияние термической обработки на свойства механически легированных материалов на основе алюминия // *Металловедение и термическая обработка металлов*. М. Машиностроение. 2007. №12. с. 25 – 29.
2. Kotov S.A., Andreeva V.D., Ganin S.V., Freidin B.M., Kuz'Mich Yu.V. Effect of heat treatment on the properties of mechanically alloyed Al-based materials // *Metal Science and Heat Treatment*. 2007. Т. 49. № 11-12. С. 574-577.
3. С.А. Котов, В.Д. Андреева, С.В. Ганин, Б.М. Фрейдin, Ю.В. Кузьмич Влияние термической обработки на свойства механически легированных материалов на основе алюминия // *Сборник трудов VII международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии их использование в технике»*. СПб. 2006г. с. 183.

4. С.А. Котов, С.В. Ганин, В.Д. Андреева, Б.М. Фрейдин, Ю.В. Кузьмич Механическое легирование – высокоэнергетический метод получения специальных порошковых материалов // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». СПб. 2007г. с. 223-231.
5. С.А. Котов, С.В. Ганин, Б.М. Фрейдин, Ю.В. Кузьмич Способы получения и свойства наноструктурированных порошков различного назначения // Сборник трудов VIII Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». СПб. 2009г. с. 385 – 385.
6. А.И. Рудской, А.М. Золотов, Р.А. Паршиков, Е.С. Смирнов, С.В. Ганин Исследование процесса РКУ прессования заготовок из алюминиевых порошков в капсулах // Сборник трудов VIII Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». СПб. 2009г. с. 50 – 56.
7. А.М. Золотов, Р.А. Паршиков, Е.С. Смирнов, С.В. Ганин Исследование процесса равноканального углового прессования заготовок из алюминиевых порошков в капсулах. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование», СПб. 2010г., №2, т.2. с. 146-153.
8. А.М. Золотов, В.Н. Цеменко, С.А. Котов С.В. Ганин Определение реологических характеристик механолегированного алюминиевого порошка при повышенных температурах. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование», СПб. 2011г., №4. с.168-272.
9. А.М. Золотов, В.Н. Цеменко, С.В. Ганин, С.А. Котов, И.И. Низовцева Исследование процесса получения наноструктурированных материалов из композиционных порошков на основе алюминия // Нанотехнологии функциональных материалов. Труды международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2012г. с. 406 – 611.
10. Моделирование процессов деформирования порошковых материалов и анализ формирования в них наноструктур / В. Н. Цеменко, Р. А. Паршиков, С. В. Ганин ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет .— СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011г.-232с.
11. Реология ультрамелкозернистых и наноструктурированных материалов / В. Н. Цеменко, С.Г. Фомин, А.Э. Александров, С.В. Ганин; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.— Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2013г. -166с.
12. А.М. Золотов, С.В. Ганин, С.А. Котов, Р.А. Паршиков, В.В. Часов Исследование процесса прокатки порошкового материала в оболочке // Сборник трудов X Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». СПб., 2013г., с. 53 – 55.

Подписано в печать 18.09.2013. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 10991б.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 550-40-14
Тел./факс: (812) 297-57-76