

На правах рукописи

Федотов Александр Федорович

**МЕХАНИКА И ТЕПЛОФИЗИКА ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ
САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
СИНТЕЗА**

05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара – 2004

Работа выполнена в Самарском государственном техническом университете

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор Амосов А.П.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Пещеренко С.Н.

доктор технических наук, профессор Шацов А.А.

доктор технических наук, профессор Левашов Е.А.

Ведущая организация:

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН
(ИСМАН)

Защита состоится «19» ноября 2004 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.188.02 при Пермском государственном техническом университете по адресу: 614600, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного технического университета

Автореферат разослан «___» _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
доктор физико-математических наук, профессор

Ташкинов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Научно-технический прогресс сопровождается появлением новых способов получения и обработки материалов и изделий. Одним из них является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) неорганических материалов, открытый российскими учеными А.Г. Мержановым, И.П. Боровинской и В.М. Шкиро (1967 г.). В основе способа лежат реакции экзотермического взаимодействия химических элементов или соединений, протекающих в режиме направленного горения. Процесс идет за счет тепла химических реакций и не требует внешней энергии для высокотемпературного нагрева. Способом СВС получают тугоплавкие соединения, интерметаллиды, керамику и материалы на их основе.

Исходный продукт для проведения СВС представляет собой смесь порошкообразных компонентов насыпной плотности или в виде спрессованного брикета. Порошкообразное состояние шихты наследуется продуктами синтеза, и они имеют низкую прочность. Совмещение в одной технологической стадии процесса СВС и силового уплотнения горячих продуктов синтеза позволяет получать беспористые высокопрочные полуфабрикаты и изделия. Среди схем технологического деформирования неостывших продуктов синтеза наиболее распространено прессование в закрытой матрице, получившее название СВС-прессование. Разогрев обрабатываемого материала при СВС-прессовании происходит за счет экзотермической реакции горения и приходится предусматривать теплоизоляцию продуктов синтеза от холодного деформирующего инструмента. Эта задача решается путем размещения горячих продуктов горения в теплоизолирующей оболочке, выполненной из сыпучего материала, и уплотнение целевого продукта осуществляется совместно с оболочкой.

В настоящее время достигнуты значительные успехи в решении физико-химических и материаловедческих задач способом СВС-прессования. В одном ряду с задачей материалобразования находится проблема уплотнения и формообразования. Важно получить не только материал, но и заготовку заданных размеров и формы. Однако до сих пор практически не изучены закономерности уплотнения и формообразования при совместном пластическом деформировании горячих продуктов синтеза и оболочки. Имеющиеся немногочисленные результаты получены эмпирическим путем, недостатки которого общеизвестны. В этой связи актуальными становятся вопросы математического моделирования и теоретического анализа процесса СВС-прессования.

Закономерности уплотнения и формообразования при СВС-прессовании определяются двумя физическими процессами – теплообменом и пластическим деформированием заготовки и оболочки в замкнутом объеме конечных размеров. В настоящее время используются простейшие одномерные теплофизические и механические модели. Так, оценка теплового режима производится из аналитического решения одномерной задачи об охлаждении бесконечной пластины в неограниченной среде. Для описания процесса пластического деформирования используется модель одноосного прессования пористой заготовки в закрытой матрице без учета оболочки и внешнего трения. Естественно, что простейшие одномерные модели не могут

адекватно описать реальный процесс СВС-прессования. Отдельного рассмотрения требуют вопросы качественных и количественных изменений свойств, происходящих при превращении холодной шихтовой заготовки одного состава в горячую пористую массу продуктов синтеза другого состава.

Для теоретического описания процесса деформирования и уплотнения порошковых тел используется континуальная теория пластического течения сжимаемых сред. Отечественными и зарубежными учеными предложены многочисленные реологические модели, отражающие сложный дилатансионный характер деформирования квазисплошных тел. Вместе с тем отсутствует теоретическое обоснование структурных моделей и условий пластичности, учитывающих несвязанное начальное состояние и локализацию пластической деформации в контактных объемах частиц порошковых материалов. Объектом континуальной теории пластичности квазисплошных тел является двухфазный материал, состоящий из твердой фазы и порового пространства. Горячие продукты СВС при температуре деформирования кроме твердого вещества и пор, как правило, содержат жидкую фазу в виде расплава легкоплавких компонентов. Однако известные модели не учитывают влияние жидкой фазы на реологические свойства пористых тел с вязким веществом. Отмеченные недостатки общей теории пластичности уплотняемых тел обуславливают актуальность вопросов разработки новых и уточнения известных континуальных моделей деформируемых твердых и твердожидких порошковых тел.

Цель работы – развитие реологических моделей деформируемых порошковых тел; разработка математических моделей, теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена и пластического деформирования при прессовании горячих продуктов СВС в сыпучей оболочке. На основе полученных результатов установить основные закономерности уплотнения и формообразования, определить пути и способы управления процессами формирования свойств спрессованных изделий.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Разработка математических моделей процесса нестационарного теплообмена многосвязанных тел конечных размеров с внутренней подвижной границей первого рода и получение расчетных данных о тепловом режиме.
2. Теоретическое обоснование и экспериментальная проверка реологических моделей твердых и твердожидких порошковых материалов.
3. Разработка математических моделей процесса горячего прессования вязких порошковых материалов с передачей давления через сыпучую оболочку.
4. Расчетные и экспериментальные исследования закономерностей уплотнения и формообразования заготовок при прессовании с сыпучей оболочкой.
5. Практическая реализация полученных научных результатов при разработке технологических схем и режимов СВС-прессования изделий различной формы.

Научная новизна работы:

1. Поставлены и методом конечных элементов решены краевые задачи плоского и осесимметричного нестационарного теплообмена в системе трех тел конечных размеров (заготовка-оболочка-инструмент) с внутренней подвижной границей первого рода (фронт горения). Получены расчетные данные о температурном поле заготовки и оболочки.

2. Разработана реологическая модель пористого вязкого тела с жидкой фазой.

3. Теоретически обоснована структурная модель порошковых материалов, учитывающая дискретно-контактную природу неупругого деформирования и локализацию неупругой деформации в контактных объемах частиц порошка.

4. Предложено общее условие пластичности, которое отражает двойственный механизм деформирования порошковых материалов – межчастичное скольжение (структурная деформация) и пластическая деформация (или разрушение) частиц.

5. Для описания процесса уплотнения в замкнутом объеме построено частное условие пластичности, которое интегрально учитывает структурное и пластическое деформирование порошкового материала, а также локализацию неупругой деформации в контактных объемах частиц.

6. Экспериментально установлены значения феноменологических констант общего и частного условий пластичности, а так же триботехнических характеристик для ряда порошковых материалов оболочки.

7. Поставлены и методом конечных элементов решены краевые задачи совместного пластического деформирования пористой нелинейно-вязкой заготовки и сыпучей оболочки со смешанными граничными условиями. На основе решений построены математические модели изотермического и неизотермического процесса СВС-прессования круглых пластин и крупногабаритных колец.

8. Выполнено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование и получены основные закономерности уплотнения и формообразования осесимметричных заготовок в зависимости от технологических параметров процесса СВС-прессования. Разработаны практические способы управления напряженно-деформированным состоянием и формообразованием заготовок.

9. Разработана математическая модель процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок в условиях плоской деформации.

10. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования ряда технологических схем радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок и научно обоснована схема, обеспечивающая получение качественных изделий.

Практическая значимость. Разработанные в работе реологические модели деформируемых твердых и твердожидких порошковых тел являются важным вкладом в развитие общей теории пластичности сжимаемых сред и могут быть использованы для решения различных технологических задач обработки давлением как химически реагирующих, так и инертных порошковых материалов.

Математические модели процессов теплообмена в терморегулирующих конденсированных системах и пластического деформирования сжимаемых тел развивают численно-аналитические методы решения соответствующих краевых задач. Разработанный аппарат является эффективным рабочим инструментом для моделирова-

ния и оптимизации процесса СВС-прессования, что позволяет научно обосновано выбирать материалы, геометрические размеры пресс-оснастки и температурно-силовые режимы нагружения для получения заготовок заданной плотности и геометрии.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований использовались в Инженерном центре СВС (СамГТУ) и Научно-учебном центре СВС МИСиС-ИСМАН (г. Москва) для повышения технического уровня процесса СВС-прессования заготовок в виде круглых, квадратных и прямоугольных пластин. Новизна технологических и конструкторских разработок защищена патентами.

Результаты диссертации внедрены в виде методик расчета и математического моделирования процессов уплотнения и формообразования при разработке процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок. Это позволило во многом упростить и ускорить стадию технологического проектирования и научно обосновать оптимальную схему прессования. Получено заключение о возможности практического внедрения схемы и рекомендуемых технологических режимов радиального СВС-прессования круглых цилиндров ступенчатым пуансоном в Исследовательском центре СВС Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН).

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований подтверждается:

- адекватностью используемых модельных представлений реальным физическим процессам, протекающим при СВС-прессовании;
- корректностью использования математического аппарата, законов теплофизики и механики деформируемого твердого тела, положений термодинамики и математической физики, вычислительных программных комплексов;
- хорошей коррелированностью данных расчетов на основе решений краевых задач экспериментальным данным при СВС-прессовании изделий различной формы.

На защиту выносятся:

1. Математические модели тепловых процессов при СВС-прессовании, учитывающие реальные условия их протекания. Результаты численного исследования теплового режима заготовки и оболочки.

2. Реологическая модель пористого вязкого тела с жидкой фазой.

3. Теоретическое обоснование структурной модели порошковых материалов, учитывающей дискретно-контактную природу неупругого деформирования частиц порошка.

4. Условие пластичности, учитывающее двойственный механизм деформирования порошковых материалов – межчастичное скольжение (структурная деформация) и пластическая деформация (или разрушение) частиц.

5. Частное условие пластичности для описания процесса уплотнения в замкнутом объеме, которое интегрально учитывает структурное и пластическое деформи-

рование порошкового материала, а также локализацию неупругой деформации в контактных объемах частиц.

6. Математические модели изотермического и неизотермического процесса СВС-прессования круглых пластин и крупногабаритных колец, позволяющие провести количественные исследования закономерностей уплотнения и формообразования.

7. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные при исследовании закономерностей уплотнения и формообразования заготовки и оболочки.

8. Математическая модель изотермического процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок в условиях плоской деформации.

9. Теоретическое и экспериментальное обоснование оптимальной схемы процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок.

10. Практические способы управления напряженно-деформированным состоянием и формообразованием заготовок.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доклады-вались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: XIII и XIV Международная научная конференция «Физика прочности и пластичности металлов и сплавов» (Самара, 1992, 1995); III Международный симпозиум «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез» (Ухань, 1995); 6 Межвузовская конференция «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 1996); V Международный симпозиум «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез» (Москва, 1999); Международная конференция «Металлофизика и деформирование перспективных материалов (Металлдеформ-99)» (Самара, 1999); Международная конференция «Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте» (Самара, 1999); 10, 11, 12, 13 Межвузовская конференция «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2000, 2001, 2002, 2003); Всероссийская научно-практическая конференция «Редкие металлы и порошковая металлургия» (Москва, 2001); выездное совещание экспертного совета по машиностроению ВАК Минобрнауки России (2001); V Всероссийская научно-практическая конференция «Современные технологии в машиностроении» (Пенза, 2002); Всероссийская конференция «Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов» (Москва, 2002); Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2002); Международная конференция «Разрушение и мониторинг свойств металлов» (Екатеринбург, 2003); VII Международный симпозиум «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез» (Краков, 2003); Всероссийская школа-семинар по современным проблемам механики деформируемого твердого тела (Новосибирск, 2003); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин» (Самара, 2003); Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2004).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и общих выводов, списка использованных источников, включающего 285

наименований. Диссертация изложена на 330 страницах машинописного текста, содержит 114 рисунков и 12 таблиц.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 59 печатных работ, в том числе получено 8 патентов РФ.

Работа выполнялась в рамках научно-технических программ Минобразования РФ «Фундаментальные исследования новых технологий и автоматизация производства в машиностроении» (1993-1997 г.г.); «Поисковые и прикладные исследования высшей школы в приоритетных направлениях науки и техники» (1995-1997 г.г.); «Трансфертные технологии, комплексы и оборудование» (1998-1999 г.г.); «Научные исследования высшей школы в области производственных технологий» (2000 г.); «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (2001-2002 г.г.); грантов Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области технических наук (проекты Т00-6.4-524 и Т02-6.4-3704).

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н., профессору Радченко Владимиру Павловичу за консультации и постоянное внимание к работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации; определяются цели исследований; излагаются научная новизна и практическая значимость работы; формулируются основные положения, выносимые на защиту; приводятся сведения об апробации работы и публикациях, структуре и объему диссертации.

В **первой главе** дана оценка современному состоянию исследований в области СВС-прессования; выполнен анализ реологических моделей и методов решения краевых задач деформирования пластичных и вязких порошковых материалов.

Основное направление исследований в области СВС-прессования связано с разработкой новых материалов с уникальными специальными или многофункциональными свойствами. Вместе с тем отсутствуют теоретические работы и математические модели процесса, которые позволили бы достоверно прогнозировать тепловой режим, напряженно-деформированное состояние, характер уплотнения и форму деформируемого объекта. Несмотря на высокий современный уровень постановки и методов решения технологических задач обработки давлением порошковых материалов, известные теоретические работы по исследованию закономерностей деформирования при СВС-прессовании ограничиваются простейшими моделями и методами решений. Также простейшие модели используются для оценки температурного режима.

Адекватное теоретическое описание процессов уплотнения и формообразования может быть получено в рамках механики деформируемых порошковых материалов при решении краевых задач совместного пластического деформирования горячих продуктов СВС и оболочки с реальными начальными и граничными условиями. Анализ современных исследований показал, что в настоящее время еще не решен ряд вопросов общей теории пластичности пористых и порошковых тел. Так,

отсутствует теоретически обоснованное условие пластичности, учитывающего несвязанное начальное состояние и локализацию неупругой деформации в контактных объемах частиц порошка; не рассмотрено влияние жидкой фазы на реологические свойства пористых вязких тел. Самостоятельное значение при решении краевых задач пластического деформирования имеет проблема задания начальных условий по плотности для продуктов СВС в связи с изменением состава и свойств исходной шихты в ходе химических реакций.

Для решения задач пластического деформирования порошковых тел необходима информация о феноменологических параметрах и их зависимости от пористости. Из-за многообразия поровой структуры не существует единых экспериментальных и теоретических функций пористости для всех разновидностей несплошных тел. Поэтому на практике реализуется подход, при котором априори принимаются определенные теоретические зависимости функций пористости и феноменологические константы находят из относительно простых опытов, например, одноосном сжатии в закрытой матрице. Наибольшее распространение и достаточно хорошее соответствие с экспериментальными данными имеют зависимости В.В. Скорохода и на их основе могут быть построены феноменологические модели деформируемых продуктов СВС и сыпучей оболочки.

Важной проблемой математического моделирования является выбор метода решения краевых задач. Наиболее полную информацию о закономерностях нестационарного теплообмена и неоднородного пластического деформирования можно получить из решения задачи численными методами. В настоящее время самым эффективным и мощным численным методом является метод конечных элементов (МКЭ), который в наибольшей степени подходит для решения задач обработки давлением горячих продуктов СВС в сыпучей оболочке.

По результатам аналитического обзора сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей и исследованию процесса теплообмена при СВС-прессовании.

Технологический цикл начинается с синтеза в режиме послыйного горения и формирования температурного поля в системе "продукты СВС-оболочка-инструмент". Рассматривалась модельная СВС-система Ti-C-Ni, которая является базовой при получении твердых сплавов на основе карбида титана TiC. Инертный никель служит связкой, и продукты синтеза образуют твердый сплав состава TiC-Ni. Температура горения термореагирующих составов системы Ti-C-Ni превосходит эвтектическую температуру $T_{эвт}$ системы TiC-Ni, составляющую $T_{эвт} = 1280$ °С, и в начальный момент времени продукты синтеза находятся в твердожидком состоянии. Расчетным путем были определены теплофизические свойства гетерогенных продуктов СВС и их зависимости от плотности и температуры. Для песка использовались справочные данные.

Начальная плотность продуктов СВС находилась следующим образом. Исходным объектом является холодная шихтовая заготовка, представляющая собой спрессованный из порошков брикет. Для шихтовой заготовки известны размеры, гравиметрическая плотность $d_{ш}$ и относительная плотность $\rho_{ш}$. Плотность собствен-

но продуктов синтеза формируется в результате протекания следующих основных процессов: 1) изменение плотности и объема конденсированной фазы при химических реакциях; 2) выделение газов, которые были адсорбированы или растворены в исходных компонентах; 3) твердо- и жидкофазное спекание горячих продуктов СВС.

Для оценки начальной плотности продуктов синтеза принималось, что при горении, которое протекает при незначительном давлении подпрессовки, за счет внутреннего давления примесных газов сохраняются размеры шихтовой заготовки. Процессом уплотнения при спекании вследствие быстротечности синтеза пренебрегается. Тогда плотность синтезированной заготовки будет определяться только изменением объема конденсированной фазы при химических реакциях. При принятых допущениях начальная относительная плотность ρ_{10} синтезированного материала рассчитывается по зависимости:

$$\rho_{10} = \rho_{ш} \frac{d_{ш}}{d_{СВС}}, \quad (1)$$

где $d_{СВС}$ – гравиметрическая плотность беспористых продуктов синтеза.

Наиболее распространенную продукцию, получаемую методом СВС-прессования, составляют пластины различной формы. Инициирование реакции горения производится с боковой поверхности или из центра шихтовой заготовки. Разработаны математические модели нестационарного теплообмена в системе трех тел конечных размеров с внутренней подвижной границей первого рода (фронт горения) для вариантов зажигания с боковой поверхности и из центра плоской заготовки. При боковом зажигании моделировался процесс теплообмен плоского слоя единичной толщины (рис. 1). В силу осевой симметрии рассматривается половина высоты слоя.

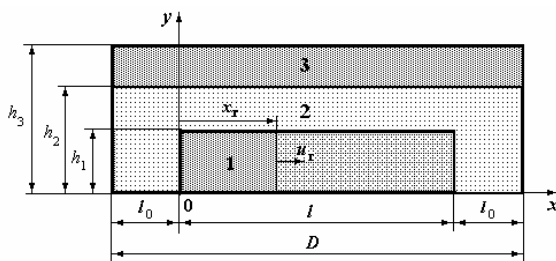


Рис. 1. Расчетная схема объекта моделирования:
1 – продукты синтеза; 2 – оболочка; 3 – пуансон

Математическая модель теплообмена на стадии горения плоского слоя включает:

1) систему трех дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности в декартовых координатах:

$$C_i d_i \frac{\partial T_i(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i(x, y, t)}{\partial y} \right); \quad (2)$$

2) граничные условия IV-го рода на контактных поверхностях:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1(x, h_1, t)}{\partial y} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, h_1, t)}{\partial y}; \quad T_1(x, h_1, t) = T_2(x, h_1, t); \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, h_2, t)}{\partial y} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3(x, h_2, t)}{\partial y}; \quad T_2(x, h_2, t) = T_3(x, h_2, t) \end{aligned} \quad (3)$$

и III-го рода на границе инструмент-окружающая среда:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(x, h_3, t)}{\partial n} + \alpha_r (T_3 - T_S) = 0; \quad (4)$$

3) начальные условия:

$$T_1(0, y_1, 0) = T_r; \quad T_2(x, y, 0) = T_S; \quad T_3(x, y, 0) = T_S; \quad (5)$$

4) уравнение движения фронта горения:

$$x_r = u_r \cdot t; \quad (6)$$

5) температуру подвижной границы первого рода (фронт горения):

$$T(x_r, y_1, t) = T_r; \quad (7)$$

6) условия адиабатичности перед фронтом горения ($x = x_r$):

$$\frac{\partial T_1(x_r - 0, y_1, t)}{\partial x} = 0. \quad (8)$$

При расчете температурного поля после сгорания всего слоя из системы уравнений (2)-(8) исключаются уравнения (6)-(8) и добавляются граничные условия четвертого рода на правой торцевой поверхности слоя при $x = l$:

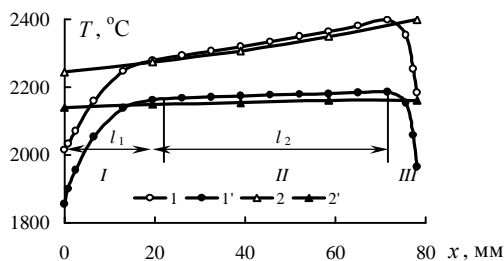
$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(l, y, t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(l, y, t)}{\partial x}; \quad T_1(l, y, t) = T_2(l, y, t). \quad (9)$$

В уравнениях (2)-(9) обозначено: T_i – температура тел; C_i , d_i , λ_i – удельная теплоемкость, гравиметрическая плотность и коэффициент теплопроводности тел системы; h_i – характерные размеры тел (рис. 1); i – индекс тела системы: 1 – продукты синтеза, 2 – оболочка, 3 – пуансон; t – время; x_r – текущая координата фронта горения; α_r – коэффициент теплоотдачи; T_S – температура среды; n – нормаль к граничной поверхности.

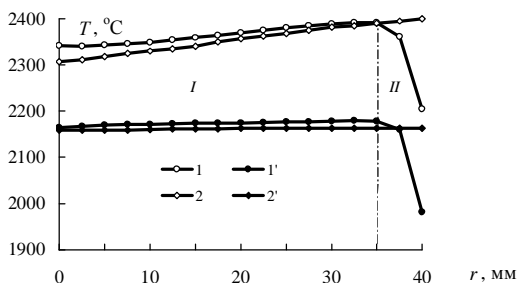
Аналогичным образом формулируется математическая модель осесимметричного теплообмена при зажигании из центра круглой заготовки. Поставленные тепловые задачи решались МКЭ.

В связи с узким интервалом изменения температуры при охлаждении продуктов синтеза в песчаной оболочке результаты решения физически нелинейной и линейной задач практически совпадают. Это позволило в дальнейшем рассматривать более простую физически линейную задачу без учета зависимости теплофизических свойств продуктов синтеза и песка от температуры. Расчеты показали, что в заготовке формируется зона с режимом внутреннего охлаждения, при котором температура контактной поверхности за фронтом горения остается постоянной и происхо-

дит выравнивание температуры по объему заготовки (рис. 2). Режим внутреннего охлаждения сохраняется в широком интервале варьирования основных технологических параметров. Результаты численного решения были сопоставлены с результатами аналитического решения одномерной задачи об охлаждении бесконечного слоя, помещенного в неограниченную среду. Для зоны с режимом внутреннего охлаждения различие численного и аналитического решений не превышает 1%.



а



б

Рис. 2. Распределение температуры по длине слоя при боковом зажигании (а) и по радиусу заготовки при центральном зажигании (б): 1, 1' – решение МКЭ; 2, 2' – аналитическое решение одномерной задачи

Результаты расчетов показали, что в пределах зоны с внутренним охлаждением температурные градиенты малы, и распределение температуры в заготовке можно считать однородным, а тепловой режим – изотермическим. В оболочке, напротив, имеют место высокие температурные градиенты и локализация высокотемпературной области в пределах узкой зоны контакта оболочки с заготовкой. Размеры зоны начала температурного разупрочнения песка не превышают 2-3 мм и можно считать, что весь объем песчаной оболочки сохраняет начальную комнатную температуру.

В реальном диапазоне варьирования технологических параметров минимальная расчетная температура выше эвтектической температуры системы TiC-Ni и продукты синтеза находятся в твердожидком состоянии.

В **третьей главе** рассмотрены реологические модели твердожидких и твердых порошковых материалов, получены определяющие соотношения и определены феноменологические параметры продуктов СВС и сыпучих материалов оболочки.

С использованием метода самосогласования и подхода В.В. Скорохода для представительного элемента в форме полого шара, частично заполненного жидкостью, получено выражение для коэффициента объемной вязкости ζ пористого твердожидкого тела:

$$\zeta = \frac{4}{3} \eta \frac{1 - (m + \theta)}{m + \theta}, \quad (10)$$

где η – коэффициент сдвиговой вязкости пористого тела; m , θ – объемные доли жидкой фазы и пор. Сопротивление сдвигу расплава на несколько порядков ниже, чем сопротивление сдвигу твердой фазы и в приближении идеальной жидкости им можно пренебречь. Так как поры также не оказывают сопротивления деформации, то жидкую и газообразную фазы можно рассматривать как одно включение с нулевым сопротивлением сдвигу и выполнить простое суммирование объемных концентраций этих фаз. Такая физическая модель приводит к следующему выражению для коэффициента сдвиговой вязкости η :

$$\eta = \eta_0 [1 - (m + \theta)]^2, \quad (11)$$

где η_0 – коэффициент сдвиговой вязкости вещества. С учетом соотношения $\rho_S + m + \theta = 1$ между объемными концентрациями твердой ρ_S , жидкой m и газообразной фаз θ получим:

$$\zeta = \frac{4}{3} \eta_0 \frac{\rho_S^3}{1 - \rho_S}; \quad \eta = \eta_0 \rho_S^2. \quad (12)$$

В определяющих соотношениях вместо коэффициентов ζ и η используются функции пористости $2\psi = \zeta/\eta_0$ и $\phi = \eta/\eta_0$, которые согласно (12) будут равны:

$$\psi = \frac{2}{3} \frac{\rho_S^3}{1 - \rho_S}; \quad \phi = \rho_S^2. \quad (13)$$

В результате реологические свойства пористого твердожидкого тела будут определяться только объемной долей ρ_S и сдвиговой вязкостью η_0 твердой фазы. Корректность предложенной модели показана на примере решения обратной задачи реологии при горячем прессовании твердожидкого порошкового сплава ВКб.

Реологические модели квазиоднородных несплошных тел получают в результате осреднения локальных напряжений и деформаций по принятому представительному объему. Объем, по которому выполнено осреднение, находится в однородном напряженно-деформированном состоянии (НДС). Для пористых тел с непрерывной матричной структурой статистическое осреднение проводят по всему объему твердой фазы V_0 . В рамках этой модели диссипативные функции несплошного тела D и его вещества с однородным НДС D_0 будут связаны зависимостью:

$$D = \rho D_0. \quad (14)$$

Соотношение (14) не удовлетворяет граничным условиям по сопротивлению де-

формации сдвига для насыпной плотности порошка, когда $\rho = \rho_0$. В этом состоянии необратимая деформация порошка начинается при произвольно малых нагрузках, а из (14) следует, что при $\rho = \rho_0$ мощность диссипации отлична от нуля: $D = \rho_0 D_0$. Следовательно, для порошковых материалов объем осреднения V_α составляет часть объема вещества V_0 . Причем при $\rho = \rho_0$ должно выполняться условие: $V_\alpha = 0$.

Энергетическое уравнение для материального элемента объемом V_α и поверхностью S_α имеет вид:

$$\int_{V_\alpha} \sigma_{ij}^0 e_{ij}^0 dV = \int_{S_\alpha} p_i^0 v_i^0 dS_\alpha, \quad (15)$$

где p_i^0 – поверхностные напряжения; v_i^0 – скорости перемещения. Из (15) следует, что наружная поверхность S_α объема V_α будет образована только контактными площадками, на которых $p_i^0 \neq 0$.

Методом сечений при условии однородного НДС в объеме V_α получено, что единичный объем осреднения кинематических и силовых параметров деформированной частицы соответствует прямому цилиндру с контактной площадкой в основании. В целом пластически деформируемое порошковое тело представляет собой контактно-стержневую систему, которая состоит из цилиндров, контактирующих своими основаниями, и испытывает однородную деформацию растяжения-сжатия.

В рамках контактно-стержневой модели равенство диссипативных функций порошкового тела D и его вещества D_0 запишется в виде

$$D = \alpha D_0, \quad (16)$$

где α – объемная доля контактного объема. Для количественной оценки параметра α предложено использовать уравнение М.Ю. Бальшина:

$$\alpha = \rho^2 \left(\frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0} \right)^b. \quad (17)$$

В состоянии насыпной плотности ($\rho = \rho_0$) объемная доля пластически деформируемого вещества $\alpha = 0$ и, согласно (16), диссипативная функция D порошкового тела также равна нулю. Тем самым обеспечивается выполнение граничных условий по сопротивлению деформации для начального насыпного состояния порошка. Кроме того, контактно-стержневая модель (16) по сравнению с матричной моделью (14) показывает лучшее соответствие с экспериментальными данными по изостатическому прессованию металлических порошков (рис. 3).

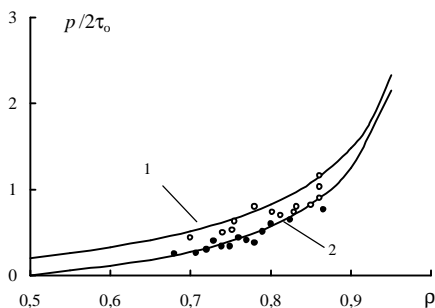


Рис. 3. Зависимость относительного давления изостатического прессования от относительной плотности порошков:

1 – расчет по (14); 2 – расчет по (17);
эксперимент: ● – олово; ○ – свинец

Методом диссипативной функции в рамках теории Скорохода-Штерна получены определяющие соотношения для порошковых тел с идеально-пластической и нелинейно-вязкой твердой фазой.

С использованием гипотезы Бельтрами и контактно-стержневой структурной модели получено общее условие пластичности порошковых материалов, учитывающее двойственный механизм пластической деформации – межчастичное скольжение (структурная деформация) и пластическая деформация (или разрушение) частиц:

$$\text{межчастичное скольжение при } \sigma \leq \sigma^*: \quad \frac{\sigma^2}{2\psi} + \frac{T^2}{\phi} = \alpha(K_0 - f\sigma)^2; \quad (18a)$$

$$\text{пластический сдвиг частиц при } \sigma > \sigma^*: \quad \frac{\sigma^2}{2\psi} + \frac{T^2}{\phi} = \alpha\tau_0^2, \quad (18б),$$

где σ – гидростатическое напряжение; T – интенсивность касательных напряжений сдвига; K_0 – константа сцепления; f – коэффициент внутреннего трения; τ_0 – предельное напряжение сдвига, равное пределу текучести τ_s (пластичные частицы) или пределу прочности τ_b (хрупкие частицы); ψ , ϕ – функции относительной плотности ρ принимаемые в виде, предложенном В.В. Скороходом: $\psi = 2\rho^3/3(1-\rho)$; $\phi = \rho^2$.

Границей между структурным и пластическим деформированием служит величина гидростатического напряжения σ^* , при котором наступает пластический сдвиг или разрушение гипотетического беспористого тела Кулона. Анализ формы поверхностей нагружения показал, что предложенное условие пластичности (18) описывает две основные особенности механического поведения порошковых материалов – пластическую дилатансию и деформационную анизотропию при гидростатическом нагружении. Форма поверхности нагружения и определяющие соотношения функционально связаны со структурным состоянием через плотность материала и с напряженным состоянием – через гидростатическое напряжение σ^* . Это усложняет практическое применение общего условия пластичности.

Для описания процесса уплотнения в замкнутом объеме с монотонным нагружением построено частное условие пластичности. Левая часть уравнений (18) представляет собой полную удельную энергию упругой деформации u порошкового тела на поверхности нагружения, отнесенную к модулю сдвига вещества твердой фазы. Экспериментальная зависимость $u(\rho)$ описывает предельное состояние порошкового тела для любых значений гидростатического напряжения σ и обоих механизмов деформации. Такие же свойства будет иметь условие пластичности, у которого материальные константы определены из зависимости $u(\rho)$. Частное условие пластичности имеет следующий вид:

$$\frac{\sigma^2}{2\psi} + \frac{T^2}{\phi} = \alpha\tau_0^2. \quad (19)$$

Если в общем условии пластичности (18) параметр α характеризует долю контактного объема, то в частном условии пластичности (19) параметр α выполняет роль функции, которая с точностью до постоянного множителя τ_0^2 аппроксимирует экспериментальную зависимость $u(\rho)$ порошкового материала. Хорошую аппроксимацию экспериментальных данных для песка и подобных ему хрупких материалов обеспечивает двухпараметрическая функция:

$$\alpha = 1 - \exp\left[-B(\ln(1-\rho_0)/(1-\rho))^\beta\right]. \quad (20)$$

По результатам экспериментальных исследований при прессовании в закрытой матрице были определены феноменологические параметры частного условия пластичности и коэффициента внешнего трения Кулона ($f_{\text{тр}} = f_k \rho^{-c}$) материалов оболочки (табл. 1). Для исключения влияния внешнего трения использовалась известная методика, когда искомые характеристики определяются по результатам прессования в одной матрице двух образцов одинаковой плотности, но имеющие разные массы и боковые площади трения.

Таблица 1

Характеристики пластичности и внешнего трения материалов оболочки

Материал	ρ_0	τ_b , МПа	B	β	f_k	c
Песок	0,61	160	0,71	1,45	0,63	0,73
Шамотная крошка	0,41	700	0,186	2,3	0,61	0,75

В **четвертой главе** разработана математическая модель процесса изотермического деформирования при СВС-прессовании.

Моделировался процесс осесимметричного прессования заготовок в форме круглых пластин. Математическая постановка краевой задачи пластического течения включает кинематические соотношения Коши для малых деформаций, уравнение неразрывности, уравнения равновесия и определяющие соотношения между

тензором напряжений σ_{ij} и тензором скоростей деформаций e_{ij} для пористой нелинейно-вязкой заготовки 1:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{2}{A}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\alpha_1}{2\psi e^2 + \phi H^2}\right)^{\frac{n-1}{2n}} \left[\left(\psi - \frac{1}{3}\phi\right)e\delta_{ij} + \phi e_{ij}\right] \quad (21)$$

и для сыпучей оболочки 2:

$$\sigma_{ij} = \frac{2\tau_b \sqrt{\alpha_2}}{\sqrt{2\psi e^2 + \phi H^2}} \left[\left(\psi - \frac{1}{3}\phi\right)e\delta_{ij} + \phi e_{ij}\right]. \quad (22)$$

Здесь e – скорость объемной деформации; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; n – индекс нелинейности течения вещества твердой фазы. Параметр α_1 в (21) для твердожидких продуктов СВС с объемной долей твердой фазы ρ_S принимается равным:

$$\alpha_1 = \rho_S^2 \frac{\rho_S - \rho_{S0}}{1 - \rho_{S0}} \quad (23)$$

где ρ_{S0} – начальная объемная доля твердой фазы.

Уравнения (21) получены методом диссипативной функции для контактно-стержневой модели дисперсно-вязкого тела со степенным законом течения. Уравнения (22) следуют из частного условия пластичности (19) с параметром α_2 , определяемым соотношением (20). Зависимость реологических свойств продуктов синтеза от температуры учитывается коэффициентом $A = C/kT \cdot \exp(-U/kT)$, где T – абсолютная температура; U – энергия активации; k – постоянная Больцмана; C – константа. На основании литературных данных о высокотемпературной прочности огнеупоров получена аппроксимирующая зависимость $\tau_b(T)$ для песчаной оболочки: $\tau_b(T) = \tau_{b0} \exp\left[-\left(\ln(T_{\text{пл}} - T_p)/(T_{\text{пл}} - T)\right)^2\right]$, где τ_{b0} – эффективный предел прочности на сдвиг частиц песка при комнатной температуре (табл. 1); $T_{\text{пл}}$, T_p – соответственно температуры плавления и начала разупрочнения кварца: $T_{\text{пл}} = 1723$ °С; $T_p = 1000$ °С.

На внешней границе оболочки задавались смешанные граничные условия. Кинематические граничные условия отражают условие непроницаемости на внешней границе оболочки. Статическая часть граничных условий выражается законом трения скольжения в виде:

$$\text{при } f_{\text{тр}} < \tau_{\text{сд}}: \quad \tau_{\text{ск}} = f_{\text{тр}} \sigma_n; \quad \text{при } f_{\text{тр}} \geq \tau_{\text{сд}}: \quad \tau_{\text{ск}} = \tau_{\text{сд}}, \quad (24)$$

где $\tau_{\text{ск}}$ – удельная сила трения скольжения; $\tau_{\text{сд}}$ – предел текучести порошкового тела на чистый сдвиг; σ_n – нормальное поверхностное напряжение. Принималось, что $\tau_{\text{сд}}$ пропорционально площади живого сечения, которое в рамках используемой реологической модели численно равно α_2 : $\tau_{\text{сд}} = \alpha_2 \tau_S$, где τ_S – максимальный предел текучести на сдвиг порошкового тела. Из определяющих соотношений (22) следует, что

$$\tau_S = T = \tau_b \sqrt{\alpha_2 \phi} \quad \text{и} \quad \tau_{\text{сд}} = \alpha_2 \tau_b \sqrt{\alpha_2 \phi}.$$

Поставленная краевая задача пластического течения со смешанными граничными

условиями приводит к квазивариационному неравенству, в которое входит неизвестное нормальное напряжение σ_n на контактных поверхностях оболочки с инструментом. Поэтому алгоритм решения задачи содержит два вложенных итерационных цикла: внешний - по определению сил контактного трения оболочки, и внутренний - по решению физически нелинейной задачи пластического течения.

Выполнены исследования на сходимость численного решения МКЭ краевой задачи осесимметричного пластического деформирования и определены оптимальные значения шага временной координаты, точности решений и размеры конечно-элементной сетки. При решении задачи пластического течения методом "по шагам" начальный шаг по времени составляет $\Delta t_0 = 0,05$ с. Точность решения физически нелинейной задачи пластического течения методом переменной вязкости и точность расчета сил внешнего трения оболочки могут быть приняты равными 5%.

Пятая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию закономерностей пластического деформирования при изотермическом СВС-прессовании круглых пластин.

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные данные изменения толщины средней части h_1 и средней относительной плотности ρ_1 заготовки в зависимости от давления прессования q . Температура деформации принималась равной средней по объему расчетной температуре в зоне с режимом внутреннего охлаждения; температура оболочки считалась равной комнатной температуре. Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности принятой физической модели оценки начальной плотности продуктов синтеза (1), математической модели теплообмена, реологических моделей твердых и твердожидких порошковых материалов и математической модели пластического деформирования при СВС-прессовании. Расчет по реологической модели порошка с осреднением микроскопических характеристик по всему объему твердой фазы показывает заметное расхождение с экспериментом (кривая 3 на рис. 4).

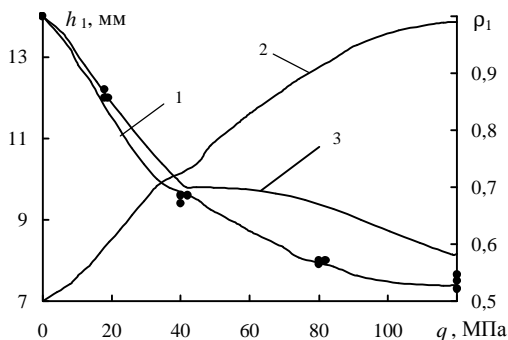


Рис. 4. Изменение толщины центра h_1 (1, 3) и относительной плотности ρ_1 (2) заготовки из сплава TiC-20% Ni в зависимости от давления прессования q : 1 – расчет по (23); 3 – расчет с $\alpha_1 = \rho_S$; • – эксперимент

В отличие от твердых инертных порошков кривые уплотнения твердожидких продуктов СВС являются немонотонными. Немонотонный ход кривых $h_1(q)$ и $\rho_1(q)$ обусловлен особенностями физического состояния и реологических свойств продуктов СВС. Дисперсное твердожидкое тело является механически устойчивым к внешнему силовому воздействию, если объемная доля твердой фазы ρ_S будет не меньше насыпной плотности ρ_{SH} . Объемная доля твердой фазы ρ_S связана с относительной плотностью ρ пористого твердожидкого тела соотношением:

$$\rho_S = \rho (1 - m_L), \quad (25)$$

где m_L – объемная доля расплава в беспористом материале. Для сплава TiC-20% Ni при температуре деформации $m_L = 0,27$ и для начальной относительной плотности $\rho_0 = 0,5$ объемная доля твердого карбида TiC составляет $\rho_S = 0,365$. Это меньше, чем критическая концентрация твердой фазы $\rho_{SH} = 0,53$, при которой наступает контактное взаимодействие частиц. Поэтому на начальном этапе уплотнения твердая фаза находится в аэродисперсном состоянии и сопротивление деформации продуктов СВС пренебрежимо мало. После уплотнения до состояния насыпной плотности ρ_{SH} начинается вязкое течение твердой фазы. Для карбида TiC индекс нелинейности течения $n = 3 > 1$ и он относится к псевдопластическим материалам, для которых характерна низкая начальная скорость вязкого течения. Этим объясняется образование горизонтального плато на кривых $h_1(q)$ и $\rho_1(q)$.

Различие реологических свойств продуктов СВС и оболочки обуславливает неоднородный характер деформирования и уплотнения приграничных объемов заготовки. Форма спрессованной заготовки определяется механическими свойствами продуктов синтеза и оболочки. Опорные поверхности получаются выпуклыми, если продукты синтеза прочнее материала оболочки. Если сопротивление деформации продуктов синтеза меньше, чем сопротивление деформации оболочки, то опорные поверхности заготовки получаются вогнутыми. Именно этот вариант характерен для реального процесса (рис. 5).

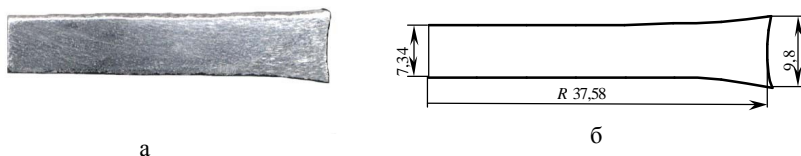


Рис. 5. Сечение СВС-спрессованной заготовки из сплава TiC-20% Ni:
а – эксперимент; б – расчет

В спрессованной оболочке образуются две зоны, отличающихся уровнем плотности и деформирующими напряжениями: центральная зона, в которой находится заготовки, и кольцевая зона, расположенную вокруг заготовки. При прессовании реальных продуктов синтеза, имеющих меньшее сопротивление деформации по сравнению с песком, кольцевая зона уплотняется в большей степени, чем центральная зо-

на. Высокоплотная кольцевая зона препятствует уплотнению центральной зоны оболочки и находящейся в ней заготовки. Соответственно, чем больше радиальные размеры кольцевой зоны, тем меньше степень деформации и уплотнения центральной зоны и находящейся в ней заготовке. Именно в этом, а не в температурном режиме, как это принято, заключается причина низкой плотности малогабаритных заготовок.

К числу основных технологических параметров относятся размеры оболочки. С

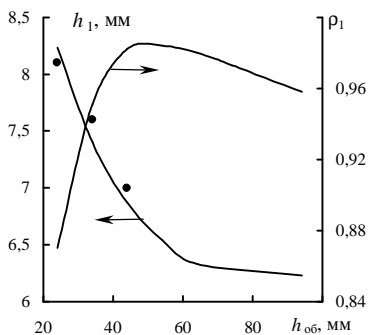


Рис. 6. Влияние начальной высоты оболочки на толщину h_1 и относительную плотность ρ_1 заготовки: ● — эксперимент

точки зрения силовых затрат необходимо ориентироваться на минимальные размеры оболочки, обеспечивающие надежную теплоизоляцию продуктов синтеза. Однако размеры оболочки играют ведущую роль в процессах уплотнения и формообразования заготовки. Начальная высота оболочки $h_{об}$ определяет ее ресурс сжимаемости. В зависимости от величины $h_{об}$ плотность заготовки изменяется экстремально (рис. 6). Для получения высокоплотных продуктов СВС ресурс сжимаемости оболочки должен быть больше ресурса сжимаемости заготовки. Сопостав-

ление результатов расчета минимальной толщины оболочки для процессов теплообмена и уплотнения показало, что, если начальная относительная плотность заготовки меньше начальной относительной плотности оболочки, то при выборе начальной высоты оболочки ведущим является процесс пластического деформирования, а процесс теплообмена имеет второстепенное значение. Как правило, именно этот вариант имеет место в практике СВС-прессования различных материалов и изделий.

Радиальные размеры оболочки определяют величину давления прессования и естественна ориентация на использование малогабаритных пресс-форм. Однако объемы оболочки вблизи боковых поверхностей с трением характеризуются сильной неоднородностью НДС. Поэтому при чрезмерном уменьшении радиальных размеров оболочки часть заготовки попадает в зону влияния внешнего трения и происходит сильное искривление опорных поверхностей заготовки.

Теоретическое и экспериментальное исследование влияния свойств материала оболочки показало, что за счет меньшего сопротивления деформации шамотной крошки по сравнению с песком продукты синтеза в шамотной оболочке уплотняются в большей степени, чем в песчаной оболочке. Кроме того, СВС-прессование в шамотной оболочке характеризуется более высокой размерной точностью спрессованной заготовки. Доля непроизводительных затрат на деформирование кольцевой

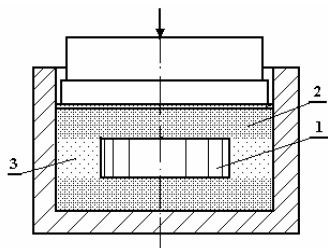


Рис. 7. Схема СВС-прессования в неоднородной оболочке: 1 – заготовка; 2 – песчаная оболочка; 3 – кольцевая шамотная оболочка

зоны оболочки существенно выше, чем доля полезно затрачиваемого усилия на деформирование центральной зоны с заготовкой. Уменьшить прочность кольцевой зоны оболочки можно за счет формирования неоднородной по составу оболочки, когда часть кольцевой зоны песчаной оболочки заполняется шамотной крошкой (рис. 7). Схема СВС-прессования в неоднородной песчано-шамотной оболочке практически эквивалентна прессованию в однородной шамотной оболочке, но при этом расходуется меньший объем более дорогого, чем

песок, шамотного материала.

В **шестой главе** рассмотрены математические модели и закономерности неизо-термического деформирования при СВС-прессовании круглых пластин и крупногабаритных колец.

Неизотермическая модель позволяет включить в число исследуемых параметров временные характеристики процесса: время задержки прессования t_3 и время выдержки при постоянном давлении прессования t_b . Необходимость временной паузы (задержка) после синтеза обусловлена временем срабатывания исполнительной системы пресса или протеканием процессов догорания.

Неизотермическая и изотермическая математические модели достаточно хорошо описывают процесс формообразования заготовки, но завышают уровень плотности. Такое расхождение вызвано образованием усадочной пористости во внутренних объемах заготовки при кристаллизации расплава. Этот процесс в рамках принятых моделей не описывается.

Расчеты показали, что при минимально необходимых временах t_3 и t_b неизотермическая и изотермическая модели дают практически одинаковые результаты расчета формы и плотности заготовки. Слабую зависимость физико-геометрических характеристик круглых заготовок от температурного режима следует связать с существенным различием температуры периферийной зоны для обеих моделей. Так, температура наиболее холодной боковой поверхности заготовки в изотермической модели составляет 1910 °С; в неизотермической модели – примерно 1770 °С и различие не превышает 8%. Кроме того, минимальная температура расчетных точек больше эвтектической температуры системы TiC-Ni и для обеих моделей весь объем заготовки находится в твердожидком состоянии.

Другая ситуация имеет место при СВС-прессовании заготовок в виде квадратных или прямоугольных пластин, имеющих ребра. Если на гладкой цилиндрической или на плоской грани происходит одномерный теплообмен, то на прямоугольных ребрах – двумерный теплообмен. Поэтому охлаждение ребер происходит с большей скоростью, чем охлаждение криволинейной или плоской боковой поверхности. Можно предположить, что область боковых ребер охлаждается ниже температуры эвтектики системы TiC-Ni, жидкой фазы нет и прочность этой области намного выше прочности остальных объемов заготовки. Это косвенно подтверждает наблюдаемая в эксперименте малая степень осадки и сильное искажение опорной поверхности заготовки в окрестности ее боковых ребер (рис. 8а).

Применение шихтовой заготовки с фасками на боковых ребрах позволяет за счет уменьшения площади теплоотводящей поверхности и скорости охлаждения ребер значительно повысить размерную точность спрессованной заготовки (рис. 8б).

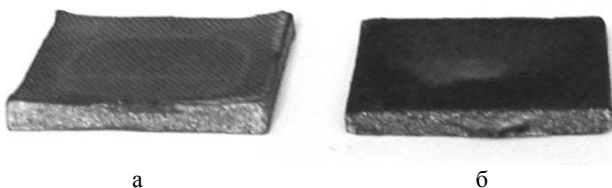


Рис. 8. Форма спрессованных заготовок с прямоугольными боковыми ребрами (а) и с фасками на боковых ребрах (б)

Время задержки t_3 определяет температурный режим начала пластической деформации и уплотнения продуктов СВС. Расчеты показали, что с ростом времени t_3 происходит уменьшение температуры начала деформирования и уменьшение плотности заготовки. Последнее подтверждено экспериментально. Для получения материала с наивысшей плотностью деформирование необходимо начинать при более высокой температуре с минимальным времени задержки t_3 .

Величина максимального давления прессования ограничена сверху усилием пресса и прочностью инструмента. Поэтому с целью увеличения времени деформирования и уплотнения продуктов СВС используется выдержка при максимальном давлении прессования. При действии постоянного напряжения может деформироваться и уплотняться вязкий материал, которым являются продукты синтеза. Пластическое деформирование жесткопластического материала оболочки происходит только при выполнении условия пластичности. Соответственно заготовка и оболочка образуют своеобразное вязкопластическое тело Шведова-Бингама, в котором роль вязкого элемента выполняет заготовки, а пластического – оболочка. Течение вязкопластических материалов носит пороговый характер и в одномерном случае прекращается тогда, когда действующие напряжения становятся меньше предела текучести. Поэтому вязкое течение и уплотнение заготовки на стадии выдержки будет происходить до тех пор, пока будет пластически деформироваться оболочка. Вследствие упрочнения локальные объемы оболочки постепенно переходят из пла-

стического в упругое состояние и препятствуют вязкому течению продуктов синтеза. Когда в упругое состояние переходит вся оболочка, то процесс вязкого течения заготовки завершается. Согласно расчетам и экспериментам время перехода оболочки из пластического состояния в упругое состояние составляет примерно 2 с, и дальнейшая выдержка под давлением не приводит к заметному уплотнению заготовки.

Более объективное подтверждение адекватности может быть получено при апробации предложенных физических и реологических моделей на экспериментальных данных других исследователей. В качестве такого теста был рассмотрен процесс СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий (КГИ), для которого в литературе приведены экспериментальные данные по закономерностям уплотнения продуктов синтеза. В отличие от прессования мало- и среднегабаритных изделий, когда давление монотонно увеличивается, прессование КГИ проводится при ступенчатом силовом нагружении. Этапы выдержки при постоянном давлении необходимы для дренажирования поровых газов из внутренних объемов заготовки. Была разработана конечно-элементная модель процесса неизотермического прессования КГИ из твердого сплава TiB-40% Ti в песчаной оболочке. По аналогии со сплавами системы TiC-Ni сплав TiB-40% Ti во всем температурном диапазоне деформирования находится в твердожидком состоянии. Достаточно хорошее соответствие результатов расчета с экспериментом (рис. 9) еще раз подтверждает адекватность предложенных физических и реологических моделей горячих продуктов СВС и сыпучей оболочки, а также корректность принимаемых допущений при постановке и решении краевых задач теплообмена и пластического деформирования в условиях СВС.

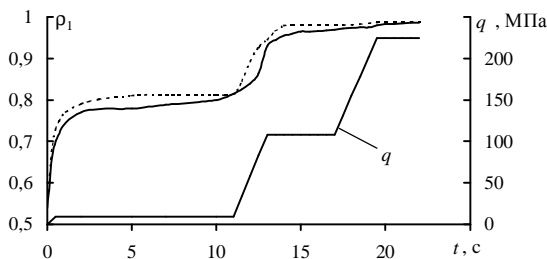


Рис. 9. Зависимости средней относительной плотности заготовки ρ_1 и давления прессования q от времени t :

— — эксперимент; - - - - - расчет

В седьмой главе с использованием разработанного подхода получена математическая модель и на ее основе решена задача технологического проектирования и оптимизации процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок.

По схеме радиального СВС-прессования (рис. 10) необходимо получить заготовку в форме правильного полуцилиндра с плоской образующей. Заготовки предназначены для изготовления из них деталей износостойких сопел пескоструйной обработки.

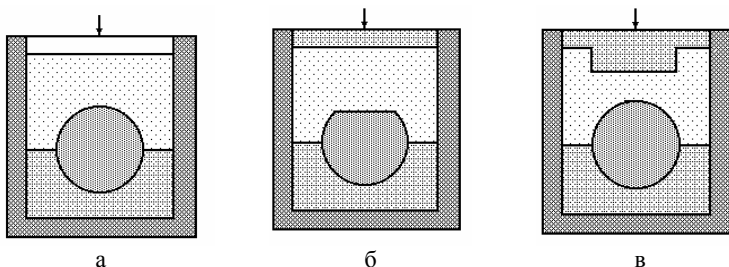


Рис. 10. Схемы радиального СВС-прессования цилиндров:
 а – базовая схема; б – прессование сегментного цилиндра;
 в – прессование ступенчатым пуансоном

Для теоретического анализа процессов уплотнения и формообразования были поставлены и МКЭ решены краевые задачи плоского пластического деформирования пористой цилиндрической заготовки из сплава TiB-40% Ti и песчаной оболочки. Использовалось приближение однородного и изотермического температурного поля. Анализ физического состояния показал, что из-за большого объема жидкой фазы в сплаве TiB-40% Ti при температуре деформирования контактное взаимодействие частиц твердой фазы отсутствует, и материал заготовки не оказывает сопротивления деформации в течение всего процесса прессования. Соответственно закономерности уплотнения и формообразования заготовки определяются деформационными свойствами песчаной оболочки.

Кинематический анализ процесса прессования однородного порошка в закрытой матрице с криволинейным контуром дна показал, что в высоких участках прессовки скорость уплотнения верхних зон больше скорости уплотнения нижних зон. Этот эффект имеет место и при радиальном СВС-прессовании: плотность верхней части спрессованного изделия больше, чем плотность нижней части. Профиль сопла выполняется на плоском участке образующей цилиндра. Поэтому формируемый неоднородный по плотности материал имеет полезный градиент плотности по высоте спрессованной заготовки.

Расчеты показали, что при радиальном СВС-прессовании также, как и при осесимметричном СВС-прессовании, в оболочке формируются две зоны: центральная зона над заготовкой и высокоплотная боковая зона по обе стороны заготовки. В ходе прессования высокоплотный материал оболочки из боковой зоны перемещается к центру и по пути внедряется в заготовку. Одновременно высокоплотная и прочная боковая зона оболочки препятствует деформированию и уплотнению центральной зоны оболочки и находящейся под ней заготовки. В результате верхняя деформируемая поверхность заготовки получается куполообразной. Увеличение начальной высоты оболочки приводит к асимптотическому уменьшению высоты купола и при радиусе заготовки 18,5 мм минимальная высота купола составляет более 6 мм. Соответственно базовая технологическая схема (рис. 10, а) является неэффективной.

Были исследованы технологические варианты радиального СВС-прессования сегментного цилиндра плоским пуансоном (рис. 10, б) и круглого цилиндра ступен-

чатым пуансоном (рис. 10, в).

Использование ступенчатого пуансона позволяет при постоянной высоте центральной зоны $h_{об}$ изменять высоту боковой зоны оболочки $h_б$. В рамках гипотезы плоских сечений процесс уплотнения определяется величиной осевой скорости деформации e_y , которая для боковой зоны будет равна $e_y = -v_0 / h_б$. При увеличении высоты $h_б$ уменьшается как скорость осевой деформации e_y , так и степень уплотнения боковой зоны оболочки.

Рассматриваемые схемы при оптимальных технологических режимах, полученных расчетным путем, обеспечивают получение заготовок с примерно одинаковым уровнем геометрической и размерной точности (рис. 11). Однако за счет уменьшения объема и массы уплотняемого материала в верхней части сегментной заготовки объем беспористого материала в этом случае намного меньше, чем для варианта прессования круглого цилиндра ступенчатым пуансоном. В связи с более высокой технологической надежностью по показателю плотности спрессованной заготовки схема радиального СВС-прессования круглого цилиндра ступенчатым пуансоном рекомендована для организации опытно-промышленного производства деталей сопла в Исследовательском центре СВС ИСМАНа.

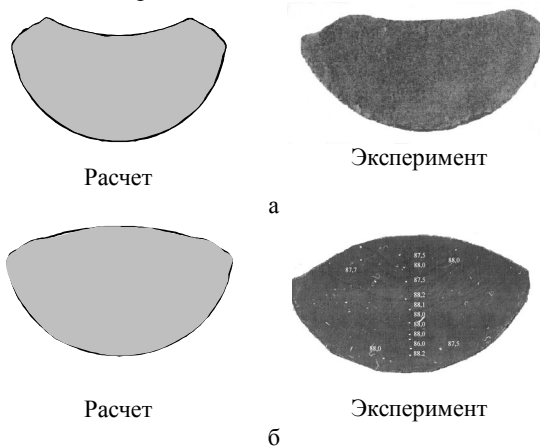


Рис. 11. Форма заготовки при радиальном прессовании сегментного цилиндра (а) и круглого цилиндра ступенчатым пуансоном (б)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели процесса теплообмена для вариантов зажигания с боковой поверхности и из центра плоской заготовки. Показано, что в связи с узким интервалом изменения температуры при охлаждении продуктов синтеза в песчаной оболочке результаты решения физически нелинейной и линейной задач практически совпадают. Установлено, что в заготовке формируется зона с режимом внутреннего охлаждения, при котором температура контактной поверхности за фронтом горения остается постоянной и происходит выравнивание температуры по объему заготовки. В пределах зоны с внутренним охлаждением распределение температуры в заготовке можно считать однородным, а тепловой режим – изотермическим. В оболочке имеют место высокие температурные градиенты и локализация высокотемпературной области в пределах узкой зоны контакта оболочки с заготовкой. Размеры зоны начала температурного разупрочнения песка не превышают 2-3 мм и можно принять, что весь объем песчаной оболочки сохраняет начальную температуру. В исследованном диапазоне варьирования технологических параметров минимальная расчетная температура выше эвтектической температуры системы TiC-Ni и продукты синтеза находятся в твердожидком состоянии.

2. Разработаны и экспериментально подтверждены реологические модели твердых и твердожидких порошковых материалов. Показано, что реологические свойства пористого твердожидкого материала определяются только объемной долей и сдвиговой вязкостью твердой фазы. Теоретически обоснована структурная модель порошковых материалов, учитывающая контактную природу неупругого деформирования частиц порошка. Методом диссипативной функции получены определяющие соотношения для порошковых материалов с различной реологией твердой фазы. В эти соотношения входит новый феноменологический параметр – объемная доля контактного объема частиц порошка.

3. На основании контактно-стержневой модели сформулировано общее условие пластичности, учитывающее двойственный механизм деформирования порошковых материалов – межчастичное скольжение и пластическая деформация (или разрушение) частиц. Для описания процесса уплотнения в замкнутом объеме построено частное условие пластичности, которое посредством аппроксимации экспериментальной зависимости изменения полной энергии упругой деформации интегрально учитывает структурную и пластическую деформацию порошкового материала. Проведены экспериментальные исследования и определены феноменологические параметры для общего и частного условий пластичности, а также триботехнические свойства сыпучих материалов теплоизолирующей оболочки.

4. На основе решения методом конечных элементов краевой задачи совместного пластического деформирования продуктов синтеза и сыпучей оболочки разработана математическая модель изотермического процесса СВС-прессования круглых заготовок. Для количественной оценки начальной плотности продуктов синтеза предложена физическая модель наследования синтезированной заготовкой размеров шихтовой заготовки. Показано, что в начальном состоянии объемная доля твердой фазы в пористых продуктах синтеза системы Ti-C-Ni меньше насыпной плотности,

частицы твердой фазы находятся во взвешенном состоянии и продукты синтеза не оказывают сопротивления деформации.

5. Выполнено исследование закономерностей деформирования продуктов синтеза системы Ti-C-Ni при СВС-прессовании в песчаной оболочке. В отличие от твердых инертных порошков для твердожидких продуктов синтеза характерен немонокотный ход кривых уплотнения. Высокая начальная скорость уплотнения обусловлена аэродисперсным состоянием и отсутствием сопротивления деформации продуктов синтеза. Горизонтальное плато на кривых уплотнения вызвано псевдопластической вязкостью твердой фазы при ее уплотнении из состояния насыпной плотности. Установлено, что различие реологических свойств материалов заготовки и оболочки приводит к неоднородному деформированию и уплотнению приграничных объемов заготовки. Опорные поверхности заготовки получаются выпуклыми, если продукты синтеза прочнее материала оболочки, и вогнутыми, если сопротивление деформации продуктов синтеза меньше, чем сопротивление деформации оболочки.

6. Исследованы закономерности деформирования оболочки. Получено, что различие реологических свойств материалов заготовки и оболочки приводит к формированию в оболочке двух зон, отличающихся уровнем плотности и деформирующими напряжениями: центральную зону, в которой находится заготовки, и кольцевую зону, расположенную вокруг заготовки. При прессовании реальных продуктов синтеза, имеющих меньшее сопротивление деформации по сравнению с песком, кольцевая зона уплотняется в большей степени, чем центральная зона. Соответственно доля непроизводительных затрат на деформирование высокопрочной кольцевой зоны существенно выше, чем доля полезно затрачиваемого усилия на деформирование центральной зоны с заготовкой. Для повышения доли полезных затрат в общем балансе сил необходимо уменьшить сопротивление деформации кольцевой зоны.

7. Изучено влияние размеров оболочки на закономерности уплотнения и формообразования заготовки. Установлен экстремальный характер изменения плотности заготовки в зависимости от начальной высоты оболочки, которая определяет ее ресурс сжимаемости. При выборе начальной высоты оболочки ведущим является процесс совместного пластического деформирования заготовки и оболочки, а процесс теплообмена имеет второстепенное значение. С уменьшением радиальных размеров оболочки возможно усиление искажения формы заготовки из-за неоднородности напряженно-деформированного состояния вблизи поверхностей инструмента с внешним трением.

8. Исследовано влияние свойств материала оболочки на закономерности уплотнения и формообразования. Получено, что за счет меньшего сопротивления деформации шамотной крошки по сравнению с песком скорость уплотнения продуктов синтеза в шамотной оболочке выше, чем в песчаной оболочке, и СВС-прессование в шамотной оболочке характеризуется более высокой размерной точностью заготовки. Предложено и апробировано техническое решение по снижению прочности кольцевой зоны за счет формирования неоднородной по составу оболочки, когда часть кольцевой зоны заполняется шамотной крошкой. Схема СВС-прессования в

неоднородной песчано-шамотной оболочке практически эквивалентна прессованию в однородной шамотной оболочке, но при этом расходуется меньший объем более дорогого, чем песок, шамотного материала.

9. Разработана математическая модель неизотермического деформирования при СВС-прессовании круглых заготовок. Выполнено экспериментальное и расчетное исследование влияния временных параметров на закономерности уплотнения и формообразования заготовок. Показано, что при минимально необходимых временах цикла прессования неизотермическая и изотермическая модели деформирования дают практически одинаковые результаты расчета формы и плотности заготовки. Неизотермическая и изотермическая модели достаточно хорошо описывают процесс формообразования заготовки, но завышают уровень плотности. Такое расхождение связано с образованием усадочной пористости во внутренних объемах заготовки при кристаллизации расплава.

10. Расчетами и экспериментальными исследованиями подтверждено, что для получения максимальной степени уплотнения синтезированного материала необходимо использовать технологический цикл с минимальным временем задержки прессования. Показано, что вязкое течение и уплотнение горячих продуктов СВС на стадии выдержки при постоянном давлении прессования происходит при условии пластической деформации оболочки и прекращается, когда оболочка вследствие упрочнения переходит в упругое состояние. Согласно расчетам время перехода оболочки из пластического состояния в упругое состояние составляет примерно 2 с, и дальнейшая выдержка под давлением не приводит к заметному уплотнению заготовки.

11. Разработана неизотермическая конечно-элементная модель процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий из сплава TiB-40% Ti со ступенчатым нагружением. Получено хорошее соответствие расчетных результатов с известными экспериментальными данными по кинетике уплотнения продуктов синтеза.

12. Разработана математическая модель процесса изотермического радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок из сплава TiB-40% Ti в условиях плоской деформации и выполнен кинематический анализ процесса. Установлено, что скорость уплотнения верхних объемов заготовки больше скорости уплотнения ее нижних объемов. В результате при радиальном СВС-прессовании формируется функционально-градиентный материал с полезным градиентом плотности по высоте спрессованной заготовки.

13. Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок. Схема прессования круглых цилиндров плоским пуансоном характеризуется низким качеством спрессованной заготовки из-за образования в оболочке высокоплотной боковой зоны. Прессование сегментного цилиндра плоским пуансоном и круглых цилиндров ступенчатым пуансоном обеспечивают получение заготовок с примерно одинаковым уровнем геометрической и размерной точности. Схема радиального СВС-прессования круглых цилиндров ступенчатым пуансоном характеризуется более высокой техно-

логической надежностью по показателю плотности спрессованного материала и рекомендована для организации опытно-промышленного производства деталей сопла для пескоструйной обработки.

14. Достаточно хорошее соответствие результатов расчета с экспериментальными данными, полученными для различных технологических схем и изделий, подтверждает адекватность предложенных физических и реологических моделей горячих продуктов СВС и сыпучей оболочки, а также корректность принимаемых допущений при постановке и решении краевых задач теплообмена и пластического деформирования в условиях СВС-прессования. Результаты исследований в виде методик расчета и математических моделей внедрены в Исследовательском центре СВС ИСМАНа при разработке процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Амосов А.П., Усанов В.М., Федотов А.Ф. Влияние состава и технологических параметров на свойства СВС-компатируемого твердого сплава // Тезисы докладов XIII Междунар. науч. конф. "Физика прочности и пластичности металлов и сплавов". Самара, 28 июня-2 июля 1992 г. – Самара, 1992. С. 160-161.

2. Амосов А.П., Бичуров Г.В., Марков Ю.М., Федотов А.Ф. Разработка технологии и материалов СВС для производства режущих пластин / В кн.: Машиностроение, приборостроение, энергетика. – М.: Изд-во МГУ, 1994. С. 70-75.

3. Федотов А.Ф. Физическая модель уплотняемых пористых продуктов горения с жидкой фазой // Тезисы докладов XIV Междунар. науч. конф. "Физика прочности и пластичности металлов и сплавов". Самара, 27-30 июня 1995 г. – Самара, 1995. С. 432-433.

4. Amosov A.P., Fedotov A.F., and Borovinskaya Inna P. Consolidation processes by SHS pressing // III International Symposium On Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Abstracts. – 23-27 October 1995, Wuhan, China. P. 37.

5. Федотов А.Ф. Моделирование процесса квазистатического прессования вязких пористых тел // Труды 6-ой Межвуз. конф. "Математическое моделирование и краевые задачи". Часть 1. Самара, 29-31 мая 1996 г. – Самара, 1996. С. 115-117.

6. Патент № 2060866 РФ. Способ получения изделий из экзотермических порошковых материалов и устройство для его осуществления / Амосов А.П., Федотов А.Ф.; приоритет от 04.05.94.

7. Amosov A.P., Fedotov A.F., and Borovinskaya Inna P. Consolidation Processes at SHS Pressing // Int. Journal of SHS. 1996. V. 5. № 3. P. 277-283.

8. Федотов А.Ф. Характеристики пластичности и внешнего трения сыпучих материалов теплоизолирующей оболочки для прессования продуктов СВС // Огнеупоры и техническая керамика. 1997. № 7. С. 14-17.

9. Патент № 2077411 РФ. Способ получения изделий из порошковых материалов / Амосов А.П., Федотов А.Ф.; приоритет от 04.05.94.

10. Патент № 2082557 РФ. Заготовка для получения изделий из экзотермических смесей / Амосов А.П., Федотов А.Ф.; приоритет от 04.05.94.

11. Патент № 2083327 РФ. Пресс-форма для изготовления изделий из СВС-смесей / Амосов А.П., Федотов А.Ф.; приоритет от 04.05.94.
12. Федотов А.Ф. Реологические свойства пористого вязкого тела с жидкой фазой // Изв. вузов. Машиностроение. 1997. № 10-12. С. 8-14.
13. Амосов А.П., Федотов А.Ф. Моделирование процесса прессования материалов СВС в сыпучей оболочке / В кн.: Фундаментальные исследования новых технологий – Липецк, Липецкое изд-во, 1998. С. 41-42.
14. Патент № 2102187 РФ. Способ получения изделий из экзотермических порошковых смесей / Амосов А.П., Федотов А.Ф.; приоритет от 04.10.95.
15. Патент № 2119847 РФ. Способ получения высокоплотных материалов и изделий реакционным спеканием под давлением / Амосов А.П., Федотов А.Ф.; приоритет от 18.04.96.
16. Патент № 2118232 РФ. Способ получения тугоплавких соединений и материалов на их основе / Амосов А.П., Федотов А.Ф., Самборук А.Р.; приоритет от 13.02.96.
17. Амосов А.П., Федотов А.Ф. О моделировании процесса деформирования пористых продуктов СВС с жидкой фазой // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Техн. науки. 1998. Вып. 5. С. 104-114.
18. Amosov A.P., Fedotov A.F. New Technical Decision Improving SHS Pressing Method // V International Symposium On Self-Propagating High-Temperature Synthesis (SHS-99). - President Hotel, Moscow, Russia.- August 16-19, 1999. P. 50.
19. Федотов А.Ф. Вариант условия пластичности при уплотнении дисперсных материалов // Труды 1-й Междунар. конф. «Металлофизика и деформирование перспективных (Металлдеформ-99)». Секция "Теория, методы и средства пластического формоизменения материалов с заданным уровнем свойств". Самара, 23-26 июня 1999 года. – Самара: СГАУ, 1999. С. 186-191.
20. Федотов А.Ф. Реодинамика и обеспечение качества материалов и изделий, получаемых СВС-прессованием в сыпучей оболочке // Труды Междунар. конф. "Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте". Часть 1. Самара, 6-8 октября 1999 года. - Самара: СамГТУ, 1999. С. 114-115.
21. Амосов А.П., Федотов А.Ф. Конструкторско-техническое обеспечение качества при квазиизостатическом СВС-прессовании // Труды Междунар. конф. "Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте". Часть 1. Самара, 6-8 октября 1999 года. - Самара: СамГТУ, 1999. С. 145-147.
22. Федотов А.Ф. Моделирование и исследование процесса деформирования горячих продуктов СВС в оболочке из сыпучего материала // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Физ.-мат. науки. 1999. Вып. 7. С. 92-106.
23. Федотов А.Ф. Аналитическая модель процесса однородного квазиизостатического прессования вязкого пористого кольца // Труды 10-ой Межвуз. конф. "Математическое моделирование и краевые задачи". Часть 1. Самара, 29-31 мая 2000 г. – Самара, 2000. С. 170-173.
24. Патент № 2165827 РФ. Устройство для прессования горячих продуктов экзотермических реакций / Амосов А.П., Федотов А.Ф.; приоритет от 21.10.98.

25. Федотов А.Ф. Математическое моделирование и исследование теплового режима при СВС-прессовании в сыпучей оболочке // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Техн. науки. 2000. Вып. 10. С. 86-93.

26. Амосов А.П., Федотов А.Ф. Вариант условия пластичности порошковых материалов // Порошковая металлургия. 2000. № 3-4. С. 4-10.

27. Амосов А.П., Федотов А.Ф. Об особенностях технологии СВС-прессования в сыпучей оболочке // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2001. № 2. С. 13-18.

28. Федотов А.Ф. Вопросы математического моделирования процесса СВС-прессования // Изв. вузов. Цветная металлургия, 2001. № 2. С. 69-75.

29. Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Осесимметричное пластическое деформирование дисперсно-вязкой заготовки в сыпучей оболочке // Труды 12-ой Межвуз. конф. "Математическое моделирование и краевые задачи". Часть 1. Самара, 29-31 мая 2001 г. – Самара, 2001. С. 209-212.

30. Амосов А.П., Федотов А.Ф. Конечно-элементная плоская модель теплового режима при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе заготовок в сыпучей оболочке // Инженерно-физический журнал. 2001. Т. 74. № 4. С. 160-166.

31. Федотов А.Ф., Амосов А.П., Радченко В.П., Ермоленко М.А. Математическая модель теплового режима при производстве заготовок из материалов на основе тугоплавких соединений методом СВС-прессования // В кн. Новые технологии в машиностроении, металлургии, материаловедении и высшем образовании. Н. Новгород, 2001. С. 352-361.

32. Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Конечно-элементная модель процесса осесимметричного пластического деформирования при СВС-прессовании // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Физ.-мат. науки. 2001. Вып. 12. С. 94-103.

33. Amosov A.P., Fedotov A.F. Energy Method of SHS Pressing Process of Products of Ti-C-Ni System // Int. Journal of SHS, 2001. Vol. 10. № 4. P. 387-402.

34. Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Экспериментальное построение условия пластичности для порошковых материалов // Тезисы докладов Всероссийской научно-практ. конф. Редкие металлы и порошковая металлургия. М., МИСиС, 3-5 декабря 2001 г., с. 86-88.

35. Федотов А.Ф., Амосов А.П. Модель квазиизостатического горячего прессования продуктов СВС системы титан-углерод-никель. 1. Структурное состояние и реологическая модель // Порошковая металлургия. 2001. № 11-12. С. 28-34.

36. Федотов А.Ф., Амосов А.П. Модель квазиизостатического горячего прессования продуктов СВС системы титан-углерод-никель 2. Результаты моделирования и экспериментальных исследований // Порошковая металлургия. 2002. № 1-2. С. 8-14.

37. Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Математическое моделирование и исследование влияния реологических свойств материала оболочки на закономерности уплотнения при СВС-прессовании // Сб. материалов V Всероссийской научно-практ. конф. Ч. 1. Пенза, 19-20 февраля 2002 г. С. 191-194.

38. Радченко В.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Численное решение краевой задачи пластического деформирования при СВС-прессовании в оболочке из одно-

родного сыпучего материала // Изв. вузов. Машиностроение. 2002. № 1. С. 15-24.

39. Федотов А.Ф., Радченко В.П., Ермоленко М.А. Конечно-элементная осесимметричная модель теплового режима при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе заготовок в сыпучей оболочке // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. № 4. С. 145-150.

40. Амосов А.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Особенности макроструктурного состояния и механизма уплотнения при силовом СВС-компактировании твердосплавных материалов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2002. № 2. С. 60-66.

41. Федотов А.Ф. Математические модели тепловых и деформационных процессов при СВС-прессовании // Труды Всероссийской конференции «Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов». Москва, 24-27 июня 2002 г. С. 478-483.

42. Радченко В.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Конечно-элементная модель процесса осесимметричного пластического деформирования при СВС-прессовании в неоднородной по составу оболочке // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Технические науки. 2002. Вып. 14. С. 83-91.

43. Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Численный анализ влияния размеров оболочки на закономерности уплотнения и формообразования при СВС-прессовании // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Физико-математические науки. 2002. Вып. 16. С. 75-80.

44. Федотов А.Ф. Исследование вариационным методом влияния свойств материала оболочки на закономерности уплотнения при СВС-прессовании // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2002. № 5. С. 63-68.

45. Федотов А.Ф. Математическое моделирование и решение задачи технологического проектирования процесса СВС-прессования // Материалы междунар. науч.-техн. конференции «Высокие технологии в машиностроении», Самара, 2002. С. 167-170.

46. Федотов А.Ф. Теплофизика и механика процесса СВС-прессования // Техника машиностроения. 2003. № 1. С. 111-119.

47. Кванин В.Л., Радченко В.П., Федотов А.Ф., Краснощеков П.И. Численное решение плоской задачи радиальной осадки пористой цилиндрической заготовки в сыпучей оболочке // Труды 13-ой Межвуз. конф. "Математическое моделирование и краевые задачи". Часть 1. Самара, 29-31 мая 2003 г. – Самара, 2003. С. 73-76.

48. Кванин В.Л., Радченко В.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Неизотермическое пластическое деформирование пористого кольца в сыпучей оболочке со ступенчатым нагружением // Труды 13-ой Межвуз. конф. "Математическое моделирование и краевые задачи". Часть 1. Самара, 29-31 мая 2001 г. – Самара, 2001. С. 103-106.

49. Радченко В.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Механика процесса деформирования горячих продуктов высокотемпературного синтеза в сыпучей оболочке // Тезисы докладов Международной конференции «Разрушение и мониторинг свойств металлов». Екатеринбург, 26-30 мая 2003. С. 5-6.

50. Кванин В.Л., Федотов А.Ф., Краснощеков П.И. Теоретический анализ про-

цесса формообразования при СВС-прессовании полуцилиндров // Сборник статей VIII Междун. науч.-техн. конф. «Проблемы машиностроения и технологии материалов на рубеже веков». Ч. II. Пенза, 2003. С. 21-24.

51. Федотов А.Ф. Структурная модель и условие пластичности порошковых материалов // Сб. докладов Всероссийской школы-семинара по современным проблемам механики деформируемого твердого тела. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. С. 235-239.

52. Кванин В.Л., Балихина Н.Т., Радченко В.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Конечно-элементная модель процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий со ступенчатым нагружением // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Физ.-мат. науки. 2003. Вып. 19. С. 97-106.

53. Amosov A.P., Fedotov A.F., Kalashnikov V.V. Simulation of SHS Pressing Process // VII International Symposium On Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Abstracts. Krakow, July 6-9th 2003. P. 3.

54. Федотов А.Ф. Математическое моделирование и обеспечение надежности процесса СВС-прессования // Сб. трудов Междун. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин». Ноябрь 2003 г. – М.: Машиностроение, 2003. С. 298-304.

55. Кванин В.Л., Балихина Н.Т., Радченко В.П., Федотов А.Ф., Краснощеков П.И. Численный анализ закономерностей уплотнения при СВС-прессовании изделий сложной формы // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Техн. науки. 2004. Вып. 20. С. 97-106.

56. Радченко В.П., Краснощеков П.И., Федотов А.Ф. Контактнo-стержневая модель пластического деформирования порошковых материалов // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия Физ.-мат. науки. 2004. Вып. 26. С. 102-107.

57. Радченко В.П., Ермоленко М.А., Федотов А.Ф. Численное решение краевой задачи пластического деформирования при СВС-прессовании в неоднородной по составу оболочке // Изв. вузов. Машиностроение. 2004. № 2. С. 16-24.

58. Кванин В.Л., Балихина Н.Т., Радченко В.П., Федотов А.Ф., Краснощеков П.И. Математическая модель процесса радиального СВС-прессования круглого цилиндра ступенчатым пуансоном // Труды Всероссийской научной конф. "Математическое моделирование и краевые задачи". Часть 1. Самара, 26-28 мая 2004 г. – Самара, 2004. С. 112-115.

59. Амосов А.П., Радченко В.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. Исследование методом конечных элементов влияния размеров оболочки на закономерности уплотнения и формоизменения при СВС-прессовании // Порошковая металлургия. 2004. № 5-6. С. 12-20.