

На правах рукописи.

Нгуен Тоан Тханг

ТЕХНОЛОГИЯ РАДИАЛЬНОГО ЭЛАСТОСТАТИЧЕСКОГО  
ПРЕССОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Специальность: 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Санкт-Петербург  
2010

Работа выполнена на кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
профессор  
Кузнецов Павел Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
Гуменюк Юрий Иванович  
  
кандидат технических наук  
Калинин Юрий Григорьевич

Ведущая организация: ОАО «Красный Октябрь»  
(г. Санкт-Петербург).

Защита состоится « 21 » декабря 2010 г. в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург ул. Политехническая, 29, лабораторно- аудиторной корпус, аудитория кафедры Машины и технология обработки металлов давлением

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

Автореферат разослан « 19 » ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Востров В. Н

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Биметаллические материалы находят всё более широкое применение в различных областях промышленности благодаря сочетанию уникальных свойств, входящих в них компонентов. К основным способам изготовления слоистых, в том числе биметаллических, изделий относятся прокатка, прессование, различные виды сварки, некоторые виды штамповки. Большинство перечисленных способов используется при изготовлении слоистых пластин, невысоких изделий простой формы. Для изготовления трубчатых слоистых изделий, наряду с перечисленными способами, применяют такой метод порошковой металлургии, как изостатическое прессование. Наиболее изученными способами прессования длинномерных трубчатых изделий из порошков, в том числе биметаллических слоистых втулок, можно считать гидростатическое и газостатическое прессование, однако их реализация требует сложного и дорогого оборудования.

Более технологичным, простым и дешевым процессом изготовления биметаллических трубчатых изделий является разновидность изостатического прессования – эластостатическое прессование (ЭСП), основанное на использовании в качестве подвижной формирующей среды эластомеров, например, полиуретанов. Преобразование осевого усилия прессового оборудования с помощью эластичной среды во всестороннее давление на окружающий материал позволяет реализовать различные схемы нагружения, в том числе наиболее эффективные для прессования тонкостенных трубчатых изделий, - радиальные обжим или раздачу.

Несмотря на указанные преимущества возможности процесса ЭСП биметаллических изделий изучены недостаточно, количество исследований по данной тематике ограничено. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные методики выбора рациональных технологических вариантов ЭСП биметаллических трубчатых изделий из порошковых материалов с различающимися характеристиками уплотнения и параметрами спекания, не разработаны технические решения и модели ЭСП, позволяющие управлять параметрами состояния уплотняемых слоев биметаллического материала, недостаточны рекомендации по проектированию пресс-форм и выбору оборудования.

Таким образом, задача создания технологии для ЭСП биметаллических втулок из металлических порошков с целью обеспечения низкой себестоимости производства и высокой производительности процесса является актуальной.

**Цель работы** – разработка научно-обоснованной методики проектирования радиального эластостатического прессования биметаллических трубчатых изделий из порошковых материалов на основе экспериментальных и теоретических исследований процесса для повышения качества и расширения номенклатуры композиционных слоистых втулок из металлических порошков.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи работы:

- исследование основных физико-механических свойств порошковых материалов, составляющих биметаллическую композицию, с целью определения поверхностей текучести и формулирования определяющих уравнений, описывающих процесс эластостатического прессования;

- разработка математической модели процесса радиального эластостатического прессования биметаллических втулок по схеме раздачи.

- экспериментальные исследования, анализ влияния основных факторов процесса прессования и спекания на прочность соединения биметаллического слоя с целью разработки соответствующих статистических моделей;

- разработка технологических рекомендаций по выбору и проектированию рациональных вариантов радиального эластостатического прессования биметаллических трубчатых изделий из металлических порошков с различающимися характеристиками уплотняемости и спекаемости.

- разработка специализированной опытной установки для радиального эластостатического прессования слоистых втулок из порошковых материалов.

**Методы исследования.** Компьютерное моделирование процесса эластостатического прессования биметаллических слоистых втулок из металлических порошков проведено методом конечных элементов на базе теории пластического течения с использованием специального программного комплекса. Экспериментальные исследования выполнены на испытательных машинах P10(Россия), Z050 и Z100 (фирмы Zwick|Roell, Германия) с использованием компьютерной обработки результатов эксперимента. Исследования прочности соединения спрессованных и спеченных слоев проведено с использованием планирования экспериментов и статистической обработки данных с целью построения регрессионных моделей.

#### **Научная новизна работы:**

Научная новизна работы заключается в разработке научно обоснованных методик проектирования технологических процессов радиального эластостатического прессования биметаллических трубчатых изделий из металлических порошковых материалов, основанных на результатах теоретических и экспериментальных исследований, включающих:

- способ радиального эластостатического прессования биметаллических трубчатых изделий из металлических порошковых материалов;

- математические модели процесса радиального эластостатического прессования биметаллических втулок из металлических порошковых материалов;

- технологические режимы разрабатываемых процессов.

### **Практическая ценность и реализация работы.**

Практическая ценность работы заключается в разработке технологии получения биметаллического втулок с рабочим слоем из цветного или легированного материала и специализированной установки для радиального эластостатического прессования трубчатых изделий, конструкция которой защищена патентом на полезную модель. Внедрение разработанной технологии обеспечивает снижение себестоимости таких изделий в 1,3...1,5 раза за счет экономии цветного материала. Некоторые результаты научных исследований будут использованы в учебном процессе – курсах лекций и лабораторных работах в ГОУ ВПО СПбГПУ.

#### **На защиту выносятся:**

1. Научно обоснованная методика проектирования технологического процесса и оснастки для радиального эластостатического прессования биметаллических слоистых втулок из металлических порошков.

2. Разработанные математические модели и результаты экспериментальных исследований.

3. Конструкция новой специализированной установки для изостатического прессования трубчатых изделий из порошковых материалов.

**Апробация работы.** Основные положения работы доложены и обсуждены на Всероссийских межвузовских научных конференциях студентов и аспирантов 35-ой и 36-ой Недель науки СПбГПУ в 2007-08гг. (С.- Петербург, СПбГПУ).

В полном объеме диссертационная работа доложена и обсуждена на научно-техническом семинаре кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (апрель 2010 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 5 работах, в том числе одна статья в журнале Перечня ВАК, статья в иностранном журнале и патент на полезную модель № 88604 от 14.07.2009г.

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунка, 30 таблиц, 2 приложения и список литературы из 103 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована научно-техническая проблема, цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проведен анализ литературных и патентных данных, посвященных современным процессам изготовления композиционных слоистых, в том числе биметаллических, изделий из металлических порошков. Показано, что биметаллические материалы представляют значительную группу среди широкой номенклатуры) применяемых в

промышленности композиционных материалов. Из выделенной группы изделий наибольший интерес представляют биметаллические трубчатые изделия.

В развитие теории и технологии прессования порошковых и композиционных материалов внесли большой вклад такие российские и зарубежные ученые как В.Н.Анциферов, А.К.Григорьев, Г. Я. Гунн, Ю.Г.Дорофеев, Б.Я.Друянов, А.М.Дмитриев, С.С.Ермаков, Г.М.Жданович, С.С.Кипарисов, В.Л. Колмогоров, Х. А. Кун, М.С. Ковальченко, А. М. Лаптев, К.К. Мертенс, Н.Н. Павлов, В. Е. Перельман, Г. Л. Петросян, О. В. Роман, А. И. Рудской, Ю.И. Рыбин, А. Г. Рябинин, В. М. Сегал, В.В. Скороход, В.Н. Цеменко, М. Б. Штерн, Р Дж. Грин, В. Джонс, Г.Кун, М. Ояне, С. Шима и многие другие.

Анализ используемых способов изготовления биметаллических слоистых материалов показывает, что наиболее широкое применение занимают процессы прокатки, прессования, сварки, нанесение порошковых покрытий и т.д. Большинство перечисленных способов используется при изготовлении слоистых пластин, невысоких изделий простой цилиндрической формы.

Для последующего изготовления деталей из слоистых материалов применяют гибку, вальцовку, холодную и горячую штамповку и другие операции обработки металлов давлением. При пластической деформации возникающие в слоях композиции зоны с разнозначными внутренними напряжениями могут привести к образованию дефектов. Порошковые материалы особенно чувствительны к растягивающим напряжениям, поэтому при изготовлении изделий сложной формы, в том числе многослойных втулок более актуальными и эффективными становятся технологии, реализующие схемы всестороннего неравномерного сжатия. Такими технологиями являются процессы, основанные на применении подвижных сред. Наиболее известные из них – гидростатическое и газостатическое прессования требуют для своей реализации дорогостоящего специального оборудования. Более простой, но эффективной технологией изготовления трубчатых изделий из порошков, является эластостатическое прессование, основанное на использовании подвижных сред в твердом состоянии – эластомеров.

Исследования различных вариантов эластостатического прессования, проведенные Б.В. Аллоем, Л.С. Богинским, А.В. Гоциридзе, П.А. Кузнецовым, Г.И. Смолием, М.И. Тимоховой, А.М. Уманским и др. учеными показали перспективность применения эластичных сред при прессовании трубчатых изделий из порошков, особенно тонкостенных втулок. Однако глубоких исследований по использованию эластичных сред для изготовления слоистых, в том числе биметаллических трубчатых изделий из металлических порошков не проводилось.

Сущностью процесса эластостатического прессования (ЭСП) является преобразование осевого усилия оборудования (гидропресса) с помощью

подвижной эластичной среды во всестороннее давление на окружающий материал, например, слой порошка.

На рис.1 представлена принципиальная схема ЭСП биметаллических слоистых втулок из порошков. Процесс ЭСП осуществляется следующим образом: засыпка порошковых материалов 4 и 5 в матрицу 3 производится либо одновременно (используется разделительная перегородка), либо последовательно после прессования предыдущего слоя. Усилие прессы передается пуансоном 1 в осевом направлении на эластичный стержень 7, который передает через сменную эластичную втулку 6 давление в радиальном направлении на порошки 4 и 5. Рабочий объем, в котором создается давление, замыкается крышкой 2 и основанием 8. После снятия давления эластичный стержень 7 и эластичная втулка 6 возвращаются в исходное состояние. Путем замены сменной втулки 6 на другой размер, соответствующий и обеспечивающий образование новой камеры засыпки, процесс прессования можно повторить и напрессовать последующий слой на предыдущий

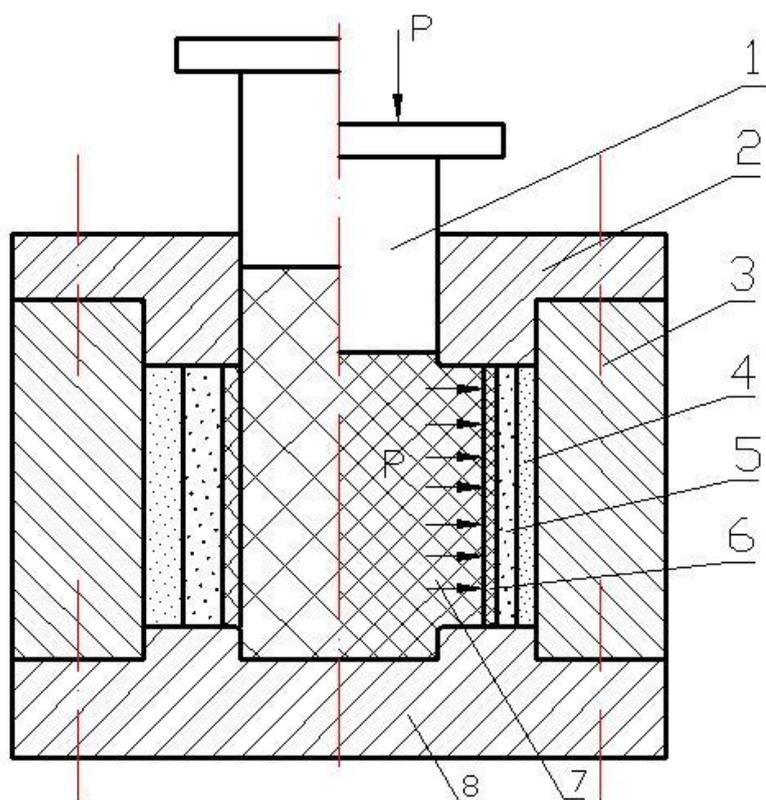


Рис.1. Принципиальная схема эластостатического прессования биметаллических слоистых втулок из порошковых материалов (по схеме радиальной раздачи).  
1- пуансон;  
2- крышка матрицы;  
3- матрица;  
4- порошок первого слоя; 5- порошок второго слоя; 6- эластичная сменная втулка;  
7- эластичный стержень;  
8- основание.

Падение давления по высоте изделия из-за трения при прессовании эластичной средой существенно меньше, чем при прессовании аналогичных изделия в жесткой пресс-форме, поэтому при ЭСП можно получать тонкостенные трубчатые изделия из порошков с большим отношением высоты к толщине стенки. Проведенный анализ показал большие возможности ЭСП и перспективность его применения для изготовления биметаллических слоистых трубчатых изделий из порошков. На основании проведенного анализа поставлены основные задачи исследования.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментальных исследований основных физико-механических характеристик исследуемых порошков, необходимых, как для построения математических моделей, так и для проектирования технологических процессов.

Для исследований были выбраны порошки на железной основе АНС100.29 и РМ225Н, характеристики которых представлены в табл.1 и порошки на медной основе БрО9Гр2 и БрО5Н5Гр3, характеристики которых представлены в табл.2. Исследование уплотняемости порошков (зависимости текущей плотности от прикладываемого давления) было проведено по методике, описанной в ГОСТ 25280-82. Результаты исследования уплотняемости аппроксимировались степенной зависимостью вида  $\theta = \theta_n + a \cdot p^b$ , наиболее удобной для последующих технологических расчетов, где  $\theta_n$  - относительная плотность насыпки,  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты.

Таблица 1. Характеристики порошковых материалов на железной основе

Наименование марки порошка	Химический состав (%)					Уравнение уплотняемости
	Fe	Ni	C	Cu	Окислы	
АНС 100.29	99,84	0	0,003	0	0,13	$\rho = 3,06 + 0,380 \cdot p^{0,356}$
РМ 225Н	96,5	2	0,5	2	0	$\rho = 2,71 + 0,589 \cdot p^{0,311}$

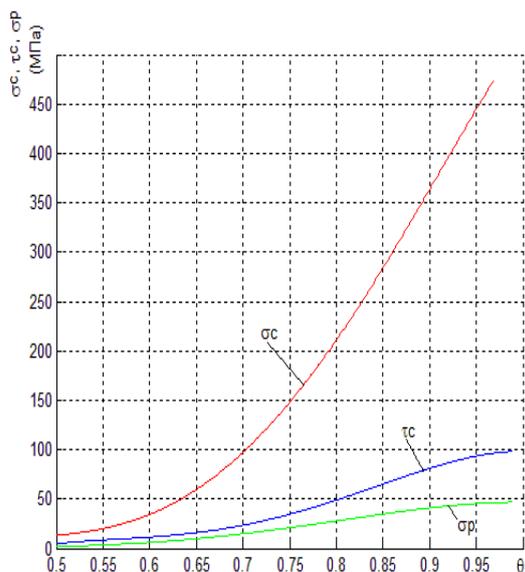
Таблица 2. Характеристики и порошковых материалов на медной основе

Наименование марки порошка	Химический состав (%)					Уравнение уплотняемости
	Cu	Sn	C	Ni	Стеарат цинка	
БрОГр2	88,3	9	2	0	0,7	$\rho = 2,18 + 1,972 \cdot p^{0,155}$
БрО5Н5Гр3	87	5	3	5	0	$\rho = 2,05 + 0,975 \cdot p^{0,283}$

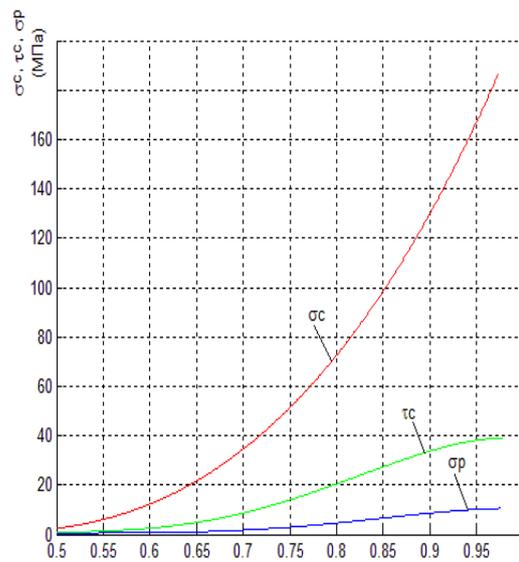
Испытания образцов на одноосное сжатие, срез, одноосное растяжение, сжатие в закрытой матрице и гидростатическое сжатие проводились на цилиндрических образцах диаметром 10мм и призматических образцах 20x50x10мм. Результаты испытаний представлены на рис.2.

Результаты экспериментов легли в основу построения кривых предельного состояния по методике, изложенной в работах В.Н.Цеменко и Ю.И.Рыбина.

Примеры кривых предельного состояния исследуемых материалов, используемые далее для построения расчетной модели радиального ЭСП биметаллических втулок из порошковых материалов, показаны на рис.3.

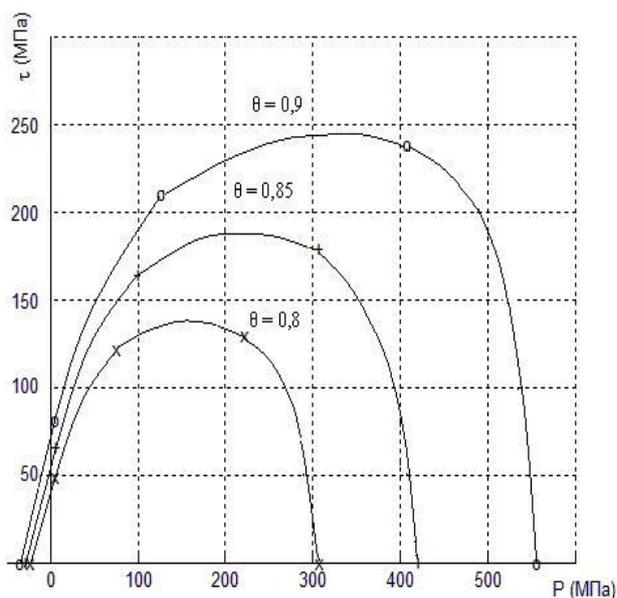


а

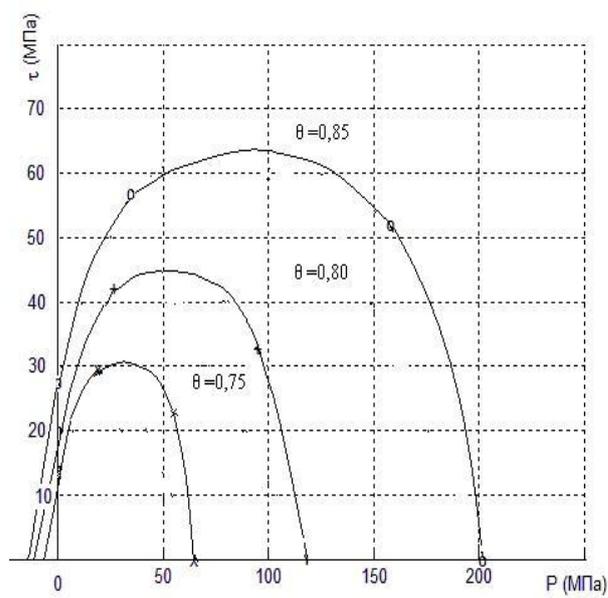


б

Рис.2 Зависимость предела прочности порошковых материала от относительной плотности при испытании на одноосное сжатие ( $\sigma_c$ ), на срез ( $\tau_c$ ) и на растяжение ( $\sigma_p$ ). а)- АНС100.29; б) – БрОГр2.



а



б

Рис.3. Кривые предельного состояния исследуемых материалов  
а) АНС100.29; б)- БрОГр2.

**Третья глава** посвящена построению расчетной модели процесса радиального ЭСП биметаллических слоистых втулок из металлических порошковых материалов. Решалась задача об определении НДС в эластичной разделительной втулке, и в порошковой втулке при ЭСП методом раздачи. На рис.4 – 6 показаны расчетные схемы постановки и решения задачи ЭСП наружного и внутреннего слоев биметаллического втулки.

Для расчетов была использована методика математического моделирования процессов обработки давлением порошковых материалов на базе параболического (третьей степени) условия пластичности и программа Multidef для многослойных моделей, разработанные в СПбГПУ проф. Ю.И. Рыбиным.

Постановка задачи для слоистой втулки осуществлялась на основе континуальных представлений о порошковой среде. Задача решалась последовательно в два этапа. На первом этапе решалась задача прессования наружного слоя биметаллического втулки, а на втором – внутреннего слоя.

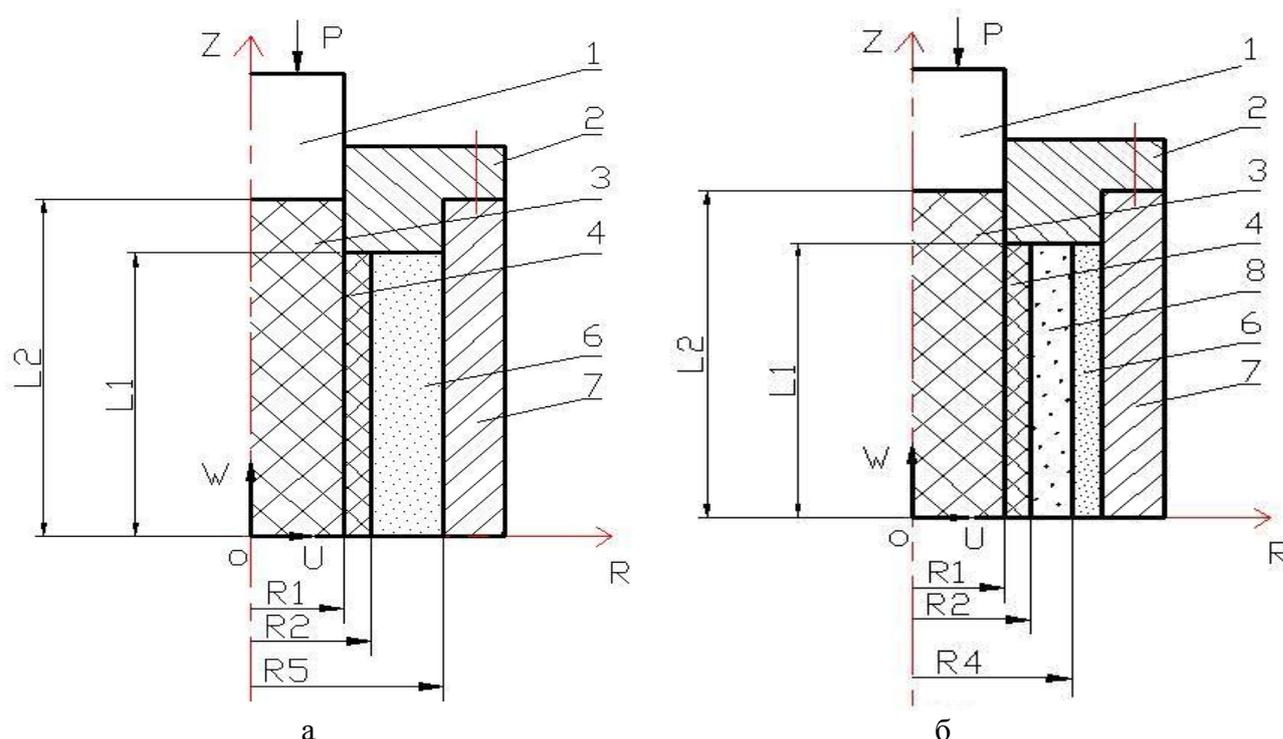


Рис.4. Расчетная схема задачи радиального ЭСП биметаллических слоистых втулок: а- прессование наружного слоя; б- прессование внутреннего слоя . 1- пуансон; 2- крышка матрицы; 3-эластичный стержень (полиуретан); 4- эластичная сменная втулка; 6- порошок наружного слоя; 7-матрица; 8- порошок внутреннего слоя.

Решение задачи осуществлялось при принятии следующих условий: эластичная среда рассматривается как изотропный линейно упругий материал; процесс прессования рассматривался как нестационарный; упругими деформациями в порошке пренебрегаем.

Коэффициент трения полиуретана по стали без смазки, принимался равным  $f_{тр} = 0.1$ . Области сменной эластичной втулки и порошка разбивались четырехугольными изопараметрическими 8-ми точечными элементами.

В качестве примера расчета размеры формующего элемента принимались: радиус эластичного стержня  $R1 = 20$ мм, наружный радиус эластичной втулки  $R2 = 26$  мм, высота эластичной втулки  $L1 = 45$ мм, высота эластичного стержня  $L2 = 120$ мм,

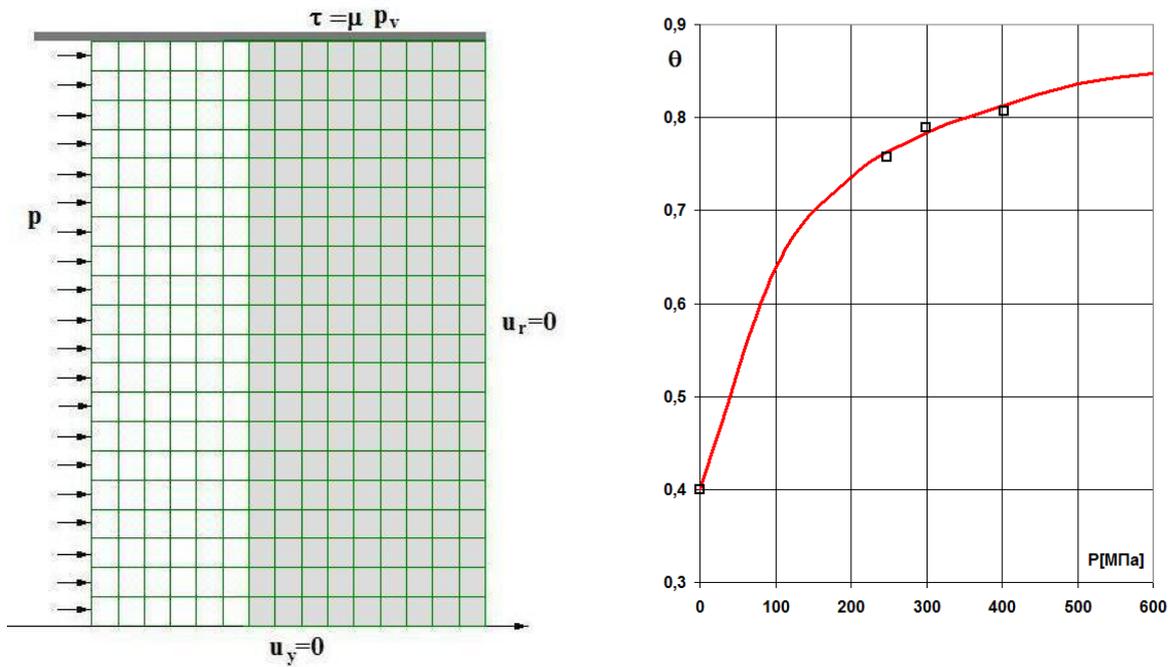


Рис. 5. Расчетная схема процесса прессования наружного слоя (слева) и зависимость средней относительной плотности наружного слоя (АНС100.29) от давления прессования (справа).

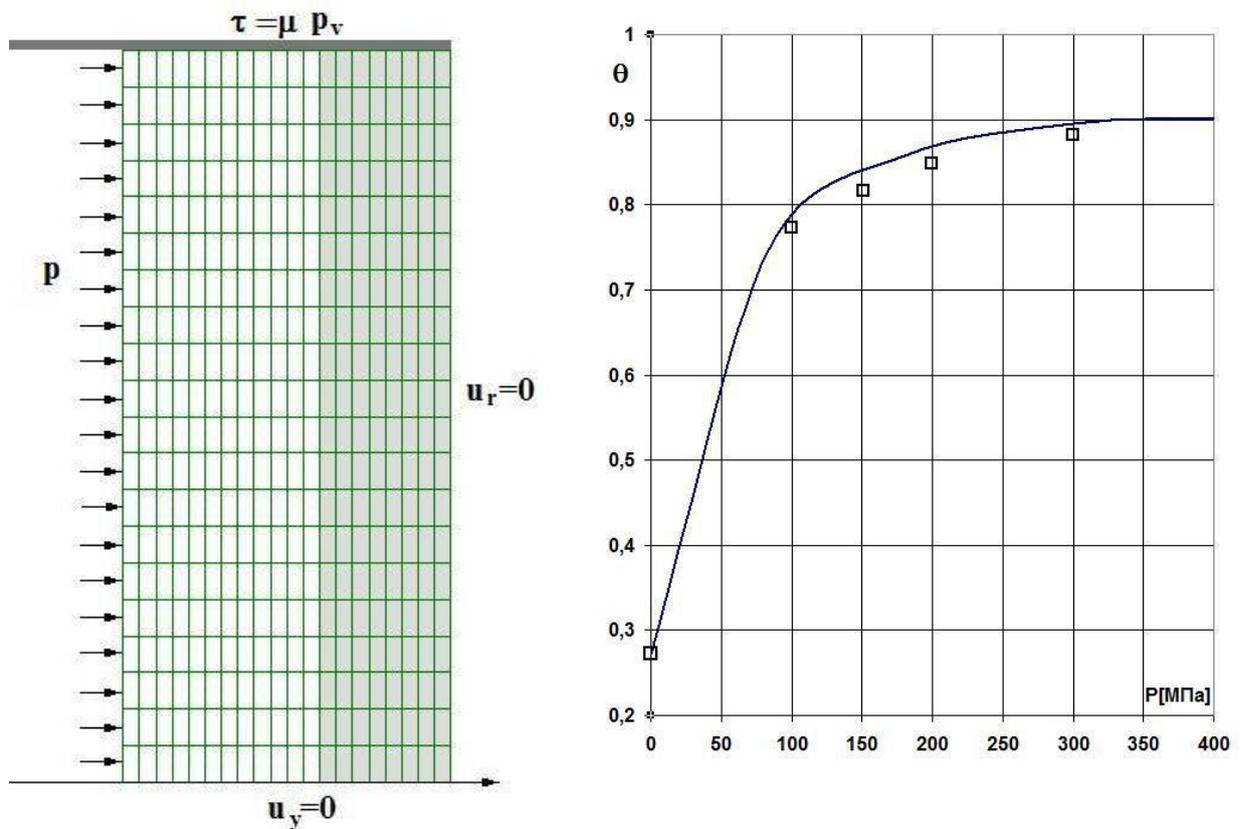


Рис. 6. Расчетная схема процесса прессования внутреннего слоя (слева) и зависимость средней относительной плотности внутреннего слоя (BrOGp2) от давления прессования (справа).

Размеры биметаллической втулки: наружный радиус втулки  $R5 = 35\text{мм}$ , наружный радиус внутреннего слоя  $R4 = 30\text{мм}$ , внутренний радиус биметаллической втулки  $R3 = 28\text{мм}$ .

На рис.5 и 6 справа представлены зависимости средней относительной плотности наружного и внутреннего слоев биметаллической втулки от давления прессования, полученные в результате моделирования, и данные эксперимента (точки на графике).

Расчет показал возможность получения равноплотных и равнотолщинных втулок правильной формы. Так, разнотолщность по высоте наружного слоя биметаллической втулки не превышает 1.2 % при давлении прессования 400 МПа. Величина разнотолщины в радиальном направлении по расчетам не превышает 0.5%.

Аналогичные результаты получены при моделировании прессования внутреннего слоя. Так, разнотолщность по высоте внутреннего слоя биметаллической втулки не превышает 1.3% при давлении прессования 300 МПа. Величина разнотолщины в радиальном направлении по расчетам не превышает 0.5%.

На основании результатов расчета видно, что разработанная расчетная модель может применяться для проектирования реальных технологических процессов ЭСП биметаллических втулок из порошков, так как результаты расчета хорошо подтверждаются экспериментальными данными. По значениям средней плотности отличия не превышают 5 -7 %.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований прочности соединения слоев биметаллических образцов, спрессованных из порошков с различающимися характеристиками уплотняемости и спекаемости.

Исходя из того, что исследование экспериментальных образцов тонкостенных биметаллических слоистых втулок весьма затруднено и сопровождается более значительными погрешностями, эксперименты по влиянию выделенных факторов на прочностные характеристики соединяемых слоёв проводились на образцах в виде биметаллических слоистых дисков с коаксиальным расположением слоев.

На качество соединения слоев в слоистом биметаллическом материале влияют много факторов. Основными из них считаются: взаимная растворимость компонентов, давление прессования, температура спекания, продолжительность спекания, направление прессования, фракционный состав, количество примесей и окислов на границах спекаемых зёрен, легирование и др. При использовании стандартных заводских порошков с конкретными фракционным и химическим составом влиять на прочность соединения слоев можно, в основном, только такими факторами как давление прессования, температура и продолжительность спекания.

Поэтому основными факторами, влияющими на прочность соединения слоев, были выбраны: плотности материалов слоев; температура совместного спекания; длительность спекания.

На основании уравнений уплотняемости исследуемых порошков, возможностей прессового оборудования и диаграммы состояния «железо-медь» выбираем следующие уровни факторов:

- относительная плотность слоя железного порошка: 0,80; 0,85; 0,90;
- относительная плотность слоя бронзового порошка: 0,75; 0,80; 0,85;
- температуры совместного спекания:  $T = 800^{\circ}\text{C}$ ,  $850^{\circ}\text{C}$  и  $900^{\circ}\text{C}$ .
- длительность совместного спекания:  $\tau = 1$  час, 2 часа и 3 часа.

При планировании эксперимента использовался оптимальный план: композиционный, симметричный, трехуровневый. Количество опытов в плане  $N = 24$ , количество повторных опытов в каждой точке плана  $n = 3$ , количество факторов  $M = 4$ . Характеристики плана  $D$  – эффективность  $e^{(D)} = 0,966$ ;  $A$  – эффективность  $e^{(A)} = 0,872$ ;  $E$  – эффективность  $e^{(E)} = 0,647$ ;  $Q$  – эффективность  $e^{(Q)} = 0,913$ .

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет построить следующие регрессионные зависимости для определения прочностных характеристик прессуемых слоев.

Модель прочности на срез с нормированными факторами для образцов из АНС100.29 и БрОГр2 имеет вид:

$$\eta = 4,0608 + 1,7874X_2^2 - 0,5376X_3^2 + 0,70896X_2 - 0,16576X_4 - 0,18042X_1X_2 + 0,81158X_1X_4 - 0,34658X_3X_4$$

Переходя к физическим факторам, которые влияют на прочность соединения на срез, получаем модель:

$$\sigma_{cp} = 4,0608 + 714,96(\theta_n - 0,85)^2 - 0,000215(T - 850)^2 + 14,1792(\theta_n - 0,85) - 0,16576(\tau - 2) - 72,168(\theta_g - 0,8)(\theta_n - 0,85) + 16,2316(\theta_g - 0,8)(\tau - 2) - 0,007(T - 850)(\tau - 2)$$

При изготовлении биметаллических образцов из порошков АНС100.29 и РМ225Н получили следующие физические модели:

прочность на срез

$$\sigma_{cp} = 133,765 + 13401,6(\theta_g - 0,8)^2 + 5126(\theta_n - 0,85)^2 + 198,86(\theta_g - 0,8) - 92,72(\theta_n - 0,85) + 6460(\theta_g - 0,8)(\theta_n - 0,85)$$

прочность на отрыв

$$\tau_{omp} = 138,98 - 8284(\theta_g - 0,8)^2 + 9384(\theta_n - 0,85)^2 + 704,16(\theta_g - 0,8) + 8400(\theta_g - 0,8)(\theta_n - 0,85)$$

Проверка статистических моделей показала их адекватность, анализ методом остатков подтвердил возможность их применения. Погрешности

модели не превышают 8 % для относительной средней погрешности и 16 % для относительной максимальной погрешности.

Металлографические исследования подтвердили возможность получения прочного и качественного соединения соединяемых слоев биметаллического образца. На рис.7 представлены микроструктуры границы биметаллических образцов, полученных при оптимальных режимах прессования и спекания.

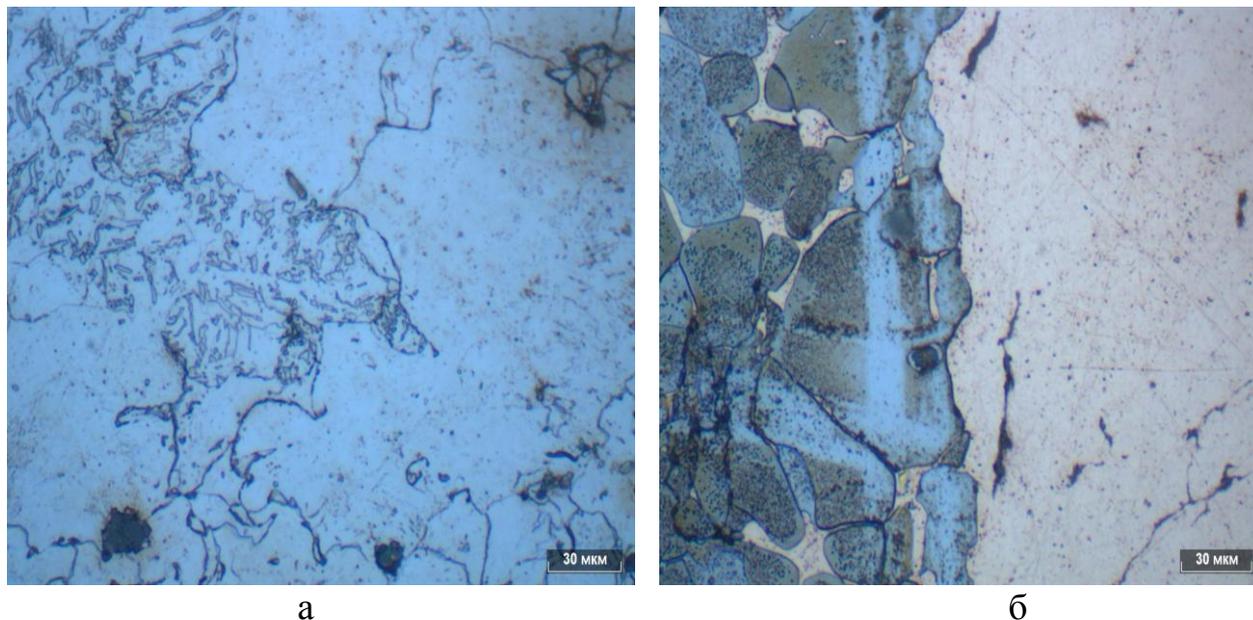


Рис.7. Микроструктуры переходной зоны биметаллических изделий из порошков: а) АНС100.29 – PM225H (x1000); б) АНС100.29- БрОГр2 (x1000).

**Пятая глава** посвящена разработке технологии радиального ЭСП биметаллических слоистых втулок из металлических порошков, проектированию оснастки и разработке специализированной установки для реализации разработанных техпроцессов. Приведен пример изготовления по разработанной технологии биметаллического подшипника скольжения с рабочим слоем из бронзового порошка.

В зависимости от характеристик уплотняемости и спекаемости порошковых материалов можно выделить следующие технологические варианты ЭСП биметаллических слоистых втулок:

I вариант- одновременная или последовательная послойная засыпка слоев; совместное прессование при заданном давлении; совместное спекание при заданной температуре.

II вариант- засыпка начального слоя (внешнего или внутреннего); прессование начального слоя при заданном давлении; засыпка последующего слоя; прессование последующего слоя при соответствующем давлении; совместное спекание при одинаковой заданной температуре.

III вариант- засыпка, прессование начального слоя; спекание начального слоя при заданной температуре; установка спеченного слоя в

пресс- форму; засыпка последующего слоя на спеченную основу; прессование- напрессовка последующего слоя; спекание композиции при соответствующей температуре.

IV вариант- отдельные изготовления каждого слоя; соединение слоев пластической деформацией; термическая обработка.

Для случая совместной обработки нескольких материалов следует рассматривать интервалы давлений прессования и интервалы температур спекания, позволяющих достичь некоторого достаточного уровня свойств в том слое, который обрабатывается совместно с другими слоями не при оптимальном режиме.

Для выбора рационального технологического варианта ЭСП слоистых композиционных материалов необходимо знать следующие исходные данные: пористость каждого слоя изделия ( $\Pi_1, \Pi_2$ ); температуру спекания каждого слоя ( $T_{сп1}, T_{сп2}$ ); длительность спекания каждого слоя ( $\tau_1, \tau_2$ ) и температуру взаимной диффузии между двумя материалами ( $T_d$ ); давление прессования каждого слоя ( $P_1, P_2$ ).

Основные принципы выбора рационального варианта изготовления слоистых композиционных втулок заключаются в следующем. Первоначально сравним температуры спекания каждого из прессуемых порошков, образующих слоистую втулку. Если интервалы возможных температур спекания данных слоёв и времени их спекания пересекаются (имеют общие значения)  $T_{сп1} \cap T_{сп2}, \tau_1 \cap \tau_2$ , то эти два слоя можно спекать вместе, если это условие не выполняется то слои необходимо спекать отдельно и, следовательно, прессовать так же отдельно.

При совместном спекании возможны два варианта, в зависимости от усилий, необходимых для прессования каждого из порошков. Если давления необходимые для прессования одного и другого порошков приблизительно равны  $P_1 \approx P_2$ , то эти слои порошков можно прессовать в одной матрице, то есть совместно. Если для прессования каждого из порошков необходимы разные давления  $P_1 \neq P_2$ , тогда данные порошки нужно прессовать отдельно в разных матрицах.

При отдельном спекании также возможны два варианта, в одном варианте сначала спекается наружный слой, затем на него напрессовывается порошок внутреннего слоя и спекаются вместе, что возможно, если температура взаимной диффузии двух слоёв меньше, чем температуры спекания этих слоёв.  $T_d < \min(T_{сп1}, T_{сп2})$ . Если данное условие не выполняется, то слои прессуются и спекаются отдельно, а затем соединяются пластической деформацией (редуцированием, дорнованием).

Сравнительный анализ вариантов с учетом трудоемкости изготовления многослойных втулок показывает, что второй вариант- последовательного прессования слоев в одной пресс-форме и последующего совместного

спекания при температуре, достаточной для спекания каждого слоя и припекания их друг к другу, является наиболее технологичным и позволяет получать биметаллические изделия широкой номенклатуры.

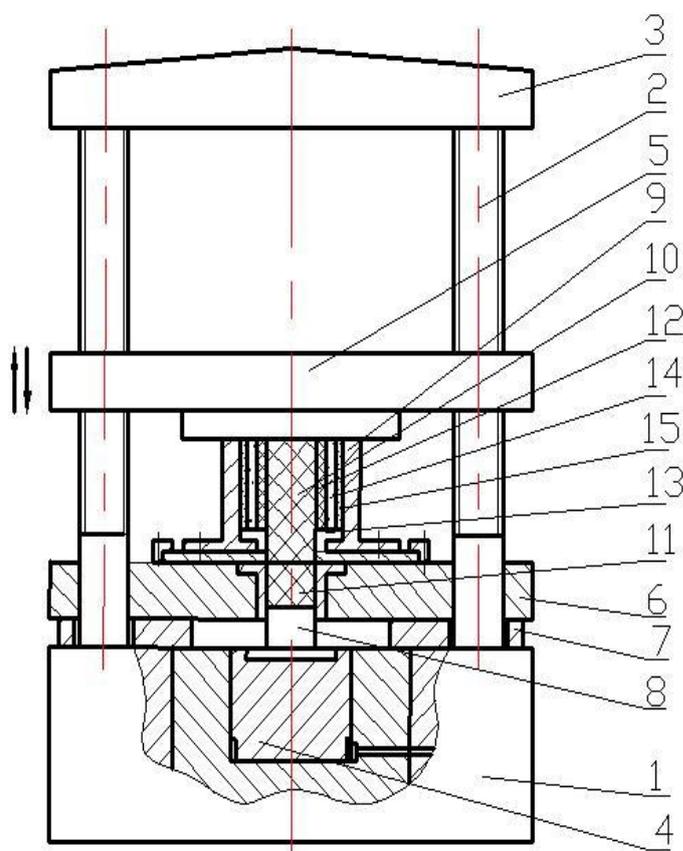


Рис.8. Установка для изостатического прессования трубчатых изделий из порошковых материалов ( Патент РФ № 88604, МПК В28В3/02)

- 1 – основание установки;
- 2 – направляющие колонны;
- 3 – верхняя неподвижная плита;
- 4 – плунжер гидроцилиндра;
- 5 – подвижная траверза;
- 6 – нижняя неподвижная плита;
- 7 – промежуточная опора;
- 8 – пуансон;
- 9 – составной контейнер;
- 10 – эластичный стержень;
- 11- эластичная вставка;
- 12- сменная эластичная втулка;
- 13- опорная втулка;
- 14- порошок внутреннего слоя;
- 15- порошок наружного слоя.

Процессы ЭСП изделий сложной формы трудно реализовать на универсальном прессовом оборудовании, поэтому с целью повышения эффективности процесса была разработана специализированная установка для изостатического прессования трубчатых изделий из порошковых материалов, представленная на рис.8. Установка работает следующим образом. В составной контейнер 9, находящийся на позиции загрузки-выгрузки, (вне рабочей зоны установки), засыпают дозированное количество прессуемых порошковых материалов в камеру засыпки 14. Контейнер 9 с порошками перемещают на позицию прессования к центру нижней плиты 6 таким образом, чтобы ось контейнера 9 и ось пуансона 8 совпали. Подвижную траверсу 5 опускают вниз и прижимают к контейнеру 9 с некоторым усилием, замыкая, таким образом, камеру засыпки 14 с порошком и верхнюю часть составного эластичного формующего элемента 10. При включении насоса установки и создании давления в силовом гидроциindre, плунжер 4 передаёт рабочее усилие  $P$  через пуансон 8 на составной эластичный формующий элемент 10, 11. Осадка составного эластичного формующего элемента 10, 11 приводит к радиальной раздаче сменной эластичной втулки 12 и, соответственно, к радиальному сжатию слоев

порошкового материала изделия. По окончании процесса прессования усилие снижают, плунжер 4 и пуансон 8 и эластичные элементы 10, 11, 12 возвращаются в исходное состояние. Подвижную траверсу 5 приподнимают на зазор, обеспечивающий свободное перемещение контейнера, а составной контейнер 9 с готовым изделием возвращают на позицию загрузки-выгрузки, на которой изделие извлекают.

## **6. Основные результаты и выводы по работе**

1. Предложены перспективные технологические процессы изготовления биметаллических втулок методом радиального эластостатического прессования на основе разработанной методики выбора рационального технологического варианта ЭСП биметаллических втулок из порошков с различающимися характеристиками уплотнения и спекания.

Разработана научно обоснованная методика проектирования технологического процесса и оснастки для радиального эластостатического прессования биметаллических втулок из металлических порошков по наиболее эффективной схеме последовательного прессования и совместного спекания слоев, позволяющая определить необходимые усилия прессования слоев, температуру спекания прессовки, основные конструктивные размеры оснастки и выбрать необходимое прессовое оборудование.

2. Исследованы основные физико-механические свойства порошковых материалов, составляющих биметаллическую композицию, с целью определения поверхностей текучести и формулирования определяющих уравнений, описывающих процесс эластостатического прессования

3. Разработанная теоретическая модель процесса ЭСП биметаллических втулок позволяет определять параметры НДС в прессуемом материале, распределение плотности по высоте и толщине слоев втулки и величину разнотолщинности спрессованного изделия. Благодаря выбранной схеме радиального прессования по схеме раздачи через эластичную сменную втулку ЭСП позволяет получать практически равноплотные и равнотолщинные изделия. Разноплотность слоистых втулок по образующей не превышает 1,5-2,5% в исследуемом диапазоне толщин и давлений прессования. Экспериментальное исследование процесса ЭСП биметаллических втулок подтвердило корректность предложенной расчетной модели.

4. На основе разработанной методики исследования и планирования эксперимента установлены основные закономерности процессов прессования и спекания порошковых материалов с различающимися характеристиками уплотнения и спекания путем построения и анализа статистических моделей прочности прессуемых слоев, обеспечивающих расчет и выбор оптимальных параметров процесса.

5. Разработана новая конструкция специализированной установки для ЭСП слоистых втулок из порошковых материалов, позволяющая эффективно с высокой производительностью (5÷6 шт./мин) изготавливать слоистые трубчатые изделия широкой номенклатуры и высокого качества. Предложенная схема установки создает предпосылки для создания автоматизированного производства и повышения эффективности производства. Новизна разработки подтверждена Патентом № 88604 МПК В28В3/02.

6. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать заключение, что радиальное ЭСП является эффективным процессом при изготовлении биметаллических втулок и других трубчатых изделий из металлических порошков высотой до 200 мм, диаметром до 100 мм и общей толщиной 5-30 мм, причем толщины отдельных слоев изделия можно варьировать в широких пределах от 2-2,5 до 15-20 мм. Разработанная технология может применяться при изготовлении слоистых трубчатых изделий широкой номенклатуры: биметаллических подшипников, многослойных фильтров и др.

#### **7. Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. П.А. Кузнецов, Т.Т. Нгуен. Эластостатическое прессование композиционных слоистых втулок // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. III. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2007.-С. 45- 46.

2. Ф.А. Демчук, Т.Т. Нгуен. Установка для испытания кольцевых спеченных образцов на одноосное растяжение // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. IV.- СПб.:Изд-во Политехн.Ун-та, 2008.–С.63- 65.

3. *Патент на полезную модель РФ № 88604 от 14.07.2009, МПК В28В3/02. Установка для изостатического прессования изделий из порошковых материалов / П.А. Кузнецов, Т.Т. Нгуен, Ф. А. Демчук*

4. *П.А. Кузнецов, Т.Т. Нгуен, Ф.А. Демчук. Методика выбора рационального технологического варианта эластостатического прессования композиционных слоистых втулок из порошковых материалов// Металлообработка, 2009.- № 6(54).- С. 25- 27.*

5. P.A. Kuznetsov, T.T. Nguyen, M.D. Dinh. Technology pressure of layer-tube composite from metal powder in elastic surroundings // University of Danang-Vietnam. Journal of science, 2008.- № 5.- С. 10- 16.