

На правах рукописи

УДК 621.762.001

、★

КОРОБОВА Наталья Васильевна

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПЛОТНЫХ ЗАГОТОВОК
ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ОБРАБОТКОЙ ДАВЛЕНИЕМ
НА ПРЕССАХ**

Специальность 05.03.05 - Технологии и машины обработки давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2009

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана.

Официальные оппоненты:

д. т. н., проф. Смирнов Олег Михайлович,

д. т. н., проф. Шестаков Николай Александрович,

д. т. н., проф. Яковлев Сергей Сергеевич

ый институт авиационных технологий

(НИА

У1888748

Коробова Н.В.

Научное обоснование и
реализация технологических
решений для производства

2009 г. 14³⁰ час. на заседании

государственном

35, г. Москва, 2-я

У1888748

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

енный печатью,

ке МГТУ им.

И.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1888748

Коробова Н.В. Научное обос

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время, при жесткой конкурентной борьбе за рынок сбыта выпускаемой продукции машиностроения, автомобилестроения, тракторостроения решение вопросов о перспективных путях улучшения качества деталей, о повышении производительности труда и ресурсосберегающих технологиях является своевременным и актуальным. Высокую роль отводят новым материалам, обладающим повышенным комплексом механических характеристик. Порошковые материалы и изделия из них в настоящее время занимают весомую долю в производстве деталей с улучшенными и специальными свойствами.

Технологические процессы получения изделий из порошков и их композиций разнообразны. В производстве относительно небольших порошковых деталей наибольшее распространение получил процесс холодного формования в закрытых пресс-формах с последующим спеканием в защитной атмосфере. Самым заметным недостатком этого высокопроизводительного процесса является высокая остаточная пористость деталей (до 15-25 % в отдельных случаях).

Уменьшение остаточной пористости связано с созданием схем приложения деформирующих сил при холодном формовании, сочетающих всестороннее сжатие и сдвиговые деформации в формируемой заготовке. В результате такого комбинированного нагружения возможно изготовить высокоплотные порошковые заготовки при силах формования, не превышающих 1000...1500 МПа, что обеспечивает удовлетворительную стойкость деформирующего инструмента. Также актуально производство заготовок с заданными свойствами, одинаковыми по всему объему изделия. Для этого необходимо разрабатывать новые методы обработки.

Одновременно с этим целесообразно решать вопросы по разработке и внедрению в промышленность сконструированных и изготовленных новых видов прессового оборудования.

Таким образом, исследования формования высокоплотных порошковых заготовок, разработка технологических и технических решений в области формования, учитывающих параметры, влияющие на комплекс прочностных характеристик изделия, и позволяющие управлять ими, являются актуальными.

Цель и задачи работы

Целью настоящей работы является разработка технологических решений проектирования операций холодной штамповки заготовок из металлических порошков, в которых используется комбинированное нагружение заготовки, снижаются величины деформирующих сил, повышается плотность

ИМ. Н. С. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

порошковых деталей, с целью обеспечения их качества (механических характеристик, физических свойств и др.).

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи.

1. Теоретически определить удельные силы, необходимые для формования со сдвигами высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок.

2. Для реализуемой в конструкции разрабатываемого пресса схемы формования со сдвигами элементов заготовки вывести зависимости накопления деформаций на стадиях последовательной пластической обработки заготовки.

3. Экспериментально исследовать влияние схем деформирования со сдвигами на микротвердость, определить геометрическое распределение микротвердостей в меридиональной плоскости заготовок.

4. Применяя магнитно-импульсную обработку установить ее влияние на характер распределения микротвердости в различных областях детали.

5. На основе изучения распределения микротвердости в плоскости заготовки построить математическую модель, позволяющую рассчитать значения микротвердости в различных точках образца в зависимости от схемы деформирования, магнитно-импульсной обработки формованной заготовки или порошка; экспериментально определить сдвиговую прочность материала неспеченной заготовки.

6. Связать количественно критерий эффективности схем деформирования со сдвигами с углом укладки зерен частиц порошка (β), сдвиговой прочностью (τ_{cp}) неспеченных формованных заготовок и прочностью детали после спекания.

7. Разработать технологический процесс формования композитных распыляемых мишеней на основе переработанной титановой стружки (Ti) и порошка дисульфида вольфрама (WS_2).

8. Провести анализ серийно выпускаемого оборудования с целью его применения для реализации предложенных схем деформирования.

9. Разработать систему автоматизированного выбора марки порошка, технологических параметров операции его формования и марки пресса для изготовления изделий с применением механических схем формования, использующих интенсивные сдвиги.

Научная новизна работы состоит в развитии научно обоснованных технических решений по формованию заготовок с созданием относительных сдвигов их элементов, а именно:

- теоретически определены удельные силы, необходимые для формования со сдвигами высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок;

- для схемы формования со сдвигами элементов заготовки выведены зависимости накопления деформаций на стадиях последовательной пластической обработки заготовки;
- экспериментально исследовано влияние схем деформирования со сдвигами на микротвердость, определено распределение микротвердостей в меридиональной плоскости заготовок;
- установлено влияние магнитно-импульсной обработки на характер распределения микротвердости в различных областях заготовки;
- на основе изучения распределения микротвердости построены математические модели, позволяющие рассчитать ее значения в различных точках заготовки в зависимости от схемы деформирования, магнитно-импульсной обработки формованной заготовки или формуемого порошка;
- экспериментально определена сдвиговая прочность материала неспеченной заготовки;
- количественно связан критерий эффективности схем деформирования со сдвигами с углом укладки зерен частиц порошка (β), сдвиговой прочностью (τ_{cp}) неспеченных формованных заготовок и прочностью детали после спекания.

Достоверность результатов работы обеспечена корректностью постановки задач, обоснованным использованием допущений, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с проведенными экспериментальными исследованиями автора, а также успешной апробацией результатов работы в промышленности.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- 1) проведен всесторонний анализ мирового серийно выпускаемого оборудования с целью определения возможности его применения для реализации обоснованных в работе схем деформирования со сдвигами;
- 2) разработана конструктивная схема специализированного малогабаритного гидравлического пресса для промышленной реализации обоснованных в работе схем деформирования со сдвигами;
- 3) создана система автоматизированного выбора марки порошка, технологических параметров операции его формования и марки пресса для изготовления изделий с применением механических схем формования, использующих интенсивные сдвиги;
- 4) разработан технологический процесс формования композитных распыляемых мишеней на основе переработанной титановой стружки (Ti) и порошка дисульфида вольфрама (WS_2);

5) разработан технологический процесс производства втулок из бериллиевой бронзы.

Внедрение результатов

Проведенные исследования нашли практическое применение при разработке технологических процессов производства высокоплотных порошковых деталей. В частности, разработан технологический процесс формирования композитных распыляемых мишеней на основе переработанной титановой стружки (Ti) и порошка дисульфида вольфрама (WS_2), производства втулок из бериллиевой бронзы и другие технологические процессы. Вследствие применения результатов работы на промышленных предприятиях получены акты с ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», с Завода экспериментального машиностроения РКК «Энергия» им. С.П. Королева, из ГУП «Конструкторское бюро приборостроения», из ФГУП ГНПП «Сплав», из ОАО «ТНТИ» из ОАО «Военно-Промышленная Корпорация «Научно-производственное Объединение Машиностроения», из Центрального Научно-Исследовательского Технологического института Машиностроения (ЦНИТИМ), из ОАО Научно-производственное предприятие «ГАЗОСВАРОЧНЫЕ АППАРАТЫ - XXI век». В актах отмечены эффективность проведенных исследований и их перспективность для развития отечественного машиностроения.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы доложены на Международном научно-техническом симпозиуме «Механика и технология в процессах формоизменения с локальным очагом пластической деформации» (Орел, 1997); на Международной конференции «Итоги развития механики в Туле» (Тула: ТулГУ, 1998); на Всероссийской научно-технической конференции «Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем и социально-экономические проблемы производства» (Калуга, 1998); на Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998); на III Международном семинаре им. В.А. Лихачева «Современные проблемы прочности» (Великий Новгород, 1999); на городской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосберегающие технологии в городском хозяйстве» (Москва, МЭИ, 1999); на отчетной конференции «Научные исследования высшей школы в области приоритетных направлений науки и техники» (Москва, 2001); на IV Международном симпозиуме им. В. А. Лихачева «Современные проблемы прочности» (Великий Новгород, 2003); на Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004); на 2 Международной научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов и процессов

деформирования материалов» (Самара: СГАУ, 2004); на Международной конференции «Образование через науку» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005); на XI Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005); на Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Липецкого государственного технического университета «Прогрессивные Технологии и оборудование в машиностроении и металлургии» (Липецк, Липецкий государственный технический университет, 2006); на Седьмой Международной научно-технической конференции «Авиакосмические технологии «АКТ-2006» (Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2006); на Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии», посвященной 140-летию высшего технического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 47 работ, среди них статей в центральной печати и рецензируемых изданиях и сборниках, входящих в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук» – 19; статей в других журналах и различных сборниках научно-технических трудов – 24; учебных пособий для ВУЗов – 4.

На защиту выносятся:

- метод аналитического определения деформирующих сил и накопленных деформаций в операциях формования заготовок;
- методика научно-обоснованного выбора схемы деформирования со сдвигами;
- математические модели влияния схемы деформирования, магнитно-импульсной обработки формованной заготовки или порошка, состава шихты порошка на показатели микротвердости в различных точках образца и на сдвиговую прочность неспеченной сформованной заготовки;
- корреляционные зависимости между показателями прочностей неспеченных заготовок и спеченных изделий;
- анализ серийно выпускаемого оборудования с обоснованием технологических решений по его модернизации для реализации предложенных схем деформирования;
- конструктивная схема специализированного пресса для реализации предложенных схем деформирования;

- система автоматизированного выбора марки порошка, технологических параметров процесса изготовления из него машиностроительной детали и конструкции прессы для достижения заданных параметров изделий при формовании их в режимах интенсивных сдвигов;

- разработанную технологию измельчения композиционного материала на основе титановых отходов и последующего прессования заготовки типа «мишень» для получения наноструктурированных износостойких покрытий многофункционального использования.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести разделов, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 352 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков, 47 таблиц, список использованной литературы из 146 наименований.

Автор выражает сердечную благодарность член-корр. РАН АЛЕКСАНДРУ МИХАЙЛОВИЧУ ДМИТРИЕВУ за оказанную помощь при выполнении работы, замечания, рекомендации и многолетнее сотрудничество.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержатся обоснование актуальности работы, сведения о научной новизне и основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассмотрено современное состояние теоретического анализа уплотнения пористых заготовок и приведены современные методы изготовления машиностроительных изделий из порошковых материалов. Рассмотрены модели формуемого тела: феноменологическая, дискретная, субмикроровня для дальнейших аналитических исследований.

Проанализировано деформированное состояние дискретного тела. Определены особенности процесса деформирования дискретной среды; взаимосвязанность сдвигов.

Проведен обзор экспериментальных исследований порошковых материалов на сдвиговую прочность. Отмечены возможности каждого вида испытаний, сложность в технике проведения экспериментов.

Приведена классификация прессового оборудования для получения изделий из металлических порошков. Отмечено отсутствие применения в промышленных масштабах процессов формования со сдвигами из-за недостатка рекомендаций по выбору универсального и отсутствия специализированного оборудования.

Значительный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований в области изготовления машиностроительных изделий из порошковых материалов внесли И.В. Александров, М.И. Алымов, А.А. Богатов, Р.З. Валиев, Г.А. Виноградов, Р. Грин, А.М. Дмитриев, Ю.Г. Дорофеев, Г.М.Жданович, С.С. Кипарисов, М.С. Ковальченко, Ю. Конно, Б.Д. Копысский, В.Н. Корнилов, И.Г. Кременский, Н.П. Лякишев, Л.А.Максименко, В.Ф. Малышев, Н.В. Мулева, Б.К. Муслин, А.Н. Мохель, А.Г. Овчинников, М. Ояне, Е.В.Перельман, И.Д. Радомысельский, О.В.Роман, Р.Л. Салганик, В.М. Сегал, Г.Г.Сердюк, В.В. Скороход, В.Н. Субич, Л. И. Тучинский, А.Ю. Смыслов, П.А. Ребиндер, М. Хиршфогель, Х. Хенес, Н.В. Щепельский, Н.А. Шестаков, С. Шима, М.Б.Штерн и др. В трудах этих ученых разработаны и усовершенствованы методы анализа процессов пластического формоизменения порошковых сред, даны рекомендации их по их применению к анализу процессов формования порошковых изделий.

Обзор научно-технической литературы показал, что, не смотря на значительное количество работ, посвященных теории и экспериментальным исследованиям процессов формования порошковых заготовок, теоретический анализ формования по схемам со сдвигами в настоящее время разработан недостаточно. Феноменологическая модель формуемого тела в виде сжимаемого континуума и дискретная модель позволяют рассчитывать технологическую силу и боковое давление на инструмент, но оставляют открытым вопрос о развитии или залечивания дефектов в заготовке в процессе уплотнения, а также об упрочнении заготовки.

Выявлено, что одним из перспективных направлений повышения плотности изделий из порошковых материалов при холодном формовании является использование интенсивных сдвигов в заготовке, изготавливаемой всесторонним сжатием. Применение воздействия импульсной магнитной обработкой повышает количество частиц с обновленной, свободной от окисных пленок поверхностей.

Схемы формования с использованием сдвигов недостаточно изучены на уровне строения микроструктуры заготовок, а также прогноза свойств готовых изделий.

В литературе приведены зависимости, связывающие деформированное состояние порошковой заготовки с ее прочностью. Однако для применения этих зависимостей необходимо проведение испытаний заготовок с использованием сложных методик и экспериментальных установок. Это вызвано большой хрупкостью заготовок, получаемых традиционными методами формования в закрытых штампах.

Обзор серийно выпускаемого оборудования для формирования порошковых деталей показывает, что для него характерны малые высоты засыпных камер и малые рабочие хода инструмента. Это не позволяет использовать его для производства высоких втулок.

Технологический процесс формирования со сдвигами не применяется в промышленных масштабах из-за отсутствия рекомендаций по выбору прессового оборудования, позволяющего реализовывать эти схемы.

Таким образом, научное обоснование и реализация технологических решений для производства высокоплотных заготовок из металлических порошков обработкой давлением на прессах является актуальной проблемой.

Сформулированы цели и обоснована постановка задач исследований.

Второй раздел посвящен определению основных допущений, позволяющих применять методы решения задач деформирования компактных заготовок к задачам для сжимаемых материалов.

Проведена оценка погрешности в описании кинематики течения при отказе от учета сжимаемости заготовки. Деформировали разрезные цилиндрические образцы с начальной высотой и диаметром, равными 30 мм, из алюминиевого сплава АВ и изготовленные формованием и спеканием из железного порошка ПЖВ4.160.28. Диаметр полости матрицы составлял 30 мм, диаметр пуансона – 20 мм. На поверхность меридионального разреза образцов была нанесена квадратная делительная сетка с шагом 1,5 мм. Компоненты тензора скоростей деформаций определяли по искаженной сетке на основании известных соотношений. Принята следующая математическая модель, коэффициенты которой определяли в результате эксперимента:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=3}^4 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=3}^4 b_{iii} X_i^3. \quad (1)$$

В качестве варьируемых факторов в модель (1) вошли материал заготовки X_1 ; глубина внедрения пуансона X_2 (отнесенная к его диаметру: рис.1, а - глубина внедрения пуансона равна 1/4 его диаметра; б - глубина внедрения пуансона равна 1/2. его диаметра); исходная координата по горизонтали точки на меридиональном сечении заготовки X_3 (отнесенная к диаметру заготовки); исходная координата точки по вертикали X_4 (отнесенная к диаметру заготовки). Центр координат располагался на оси заготовки на верхнем торце.

После реализации экспериментов по плану матрицы $2^2 \times 4^2 // 16$ и обработке полученных данных получено уравнение регрессии:

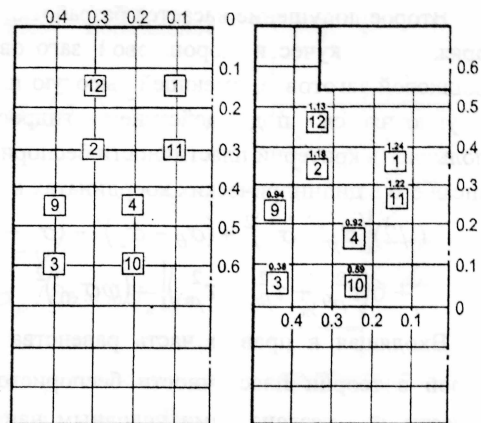
$$\xi_i = -0,475 - 0,14X_1 + 16h + 1,445r + 3,96z + 14,1r^2 + 3,79z^2 - 38,9r^3 - 17,5z^3.$$

Анализ последнего уравнения показал, что ошибка при неучете сжимаемости заготовки в расчетах интенсивности скоростей деформаций при выдавливании не превышает 12 %.

Заметим, что мы исследовали начальную стадию выдавливания стакана, когда глубина полости составляла 0,25...0,5 ее диаметра. При выдавливании более глубоких полостей резко снижается точность замеров искаженной координатной сетки на меридиональном сечении заготовок.

В то же время по мере увеличения глубины полости плотность выдавливаемой заготовки возрастает. При холодном выдавливании стаканов из спеченных заготовок с исходной пористостью 13...15 % средняя плотность выдавленных стаканов 97...98 %

пластической деформации на заключительной стадии выдавливания, почти 100 %. При этом погрешность вследствие отказа от учета сжимаемости будет значительно меньше полученных выше 12%.



Результаты исследования и приведенные комментарии позволяют допустить использование условия несжимаемости при выборе кинематических функций для описания скоростей течения.

Второе допущение касается разработки методики определения условного напряжения текучести порошковой заготовки. Для анализа напряжений в порошковой заготовке, имеющей высокую плотность, допустив, что она более не уплотняется под действием гидростатического давления, можно использовать критерий пластичности беспористого материала Губера – Мизеса, записав его в цилиндрических координатах в виде:

$$(1/2)[(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + 6(\tau_{\rho\theta}^2 + \tau_{\theta z}^2 + \tau_{\rho z}^2)] = (\varphi\sigma_{s0})^2. \quad (2)$$

Входящая в правую часть равенства (2) величина $\varphi\sigma_{s0}$, на месте которой в теории пластичности беспористого материала стоит напряжение текучести σ_s , названа нами условным напряжением текучести порошковой заготовки.

Методика определения $\varphi\sigma_{s0}$ состоит в проведении эксперимента по формированию в закрытой матрице брикетов с отношением высоты к диаметру меньше 0,25 из исследуемой порошковой шихты и из теоретического анализа этой операции, рис. 2, при этом:

1. находят экспериментально зависимость между удельной силой формирования и средней плотностью брикета;
2. устанавливают теоретическую зависимость между удельной силой формирования и средней плотностью брикета, в которую входит $\varphi\sigma_{s0}$;
3. сравнивая удельные силы формирования, полученные теоретически и экспериментально, находят зависимость напряжения текучести неспеченной порошковой заготовки от плотности.

Условие пластичности при формировании цилиндрических образцов

$$\sigma_\rho^2 - \sigma_\rho\sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{\rho z}^2 = \varphi^2\sigma_{s0}^2$$

где $\varphi = \varphi(\Pi, \sigma_0)$ - функция пористости и среднего нормального напряжения.

Уравнения связи между деформациями и напряжениями

$$\left. \begin{aligned} d\xi_\rho &= d\lambda[3(\sigma_\rho - \sigma_0) - (2/3)\sigma_{s0}^2 \varphi(\partial\varphi/\partial\sigma_0)]; \\ d\xi_z &= d\lambda[3(\sigma_z - \sigma_0) - (2/3)\sigma_{s0}^2 \varphi(\partial\varphi/\partial\sigma_0)]; \\ d\gamma_{\rho z} &= 3d\lambda\tau_{\rho z}, \end{aligned} \right\}$$

где $d\lambda$ - неопределенный множитель Лагранжа.

На рис. 3 показана осадка многослойной заготовки в закрытой матрице: справа начало уплотнения, слева – окончание. Поскольку ξ_θ равна 0, тогда $\sigma_\rho = \sigma_\theta$. Среднее нормальное напряжение принимает вид

$$\sigma_0 = (2\sigma_\rho + \sigma_z)/3 = \sigma_\rho(2 + \sigma_z/\sigma_\rho)/3$$

Уравнения равновесия:

$$\left. \begin{aligned} \partial\sigma_\rho/\partial\rho + \partial\tau_{\rho z}/\partial z &= 0, \\ \partial\tau_{\rho z}/\partial\rho + \tau_{\rho z}/\rho + \partial\sigma_z/\partial z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

С учетом $\tau_{\rho z} = \varphi(z) \times f(\rho)$ и $\partial\sigma_\rho/\partial z = \partial\sigma_z/\partial z$

(3) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \partial\sigma_\rho/\partial\rho &= -\varphi'(z)f(\rho), \\ \partial\sigma_\rho/\partial z &= -\varphi(z)[f'(\rho) + f(\rho)/\rho]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Касательные напряжения по боковой поверхности

$$\tau_{\rho z} = \mu\sigma_\rho$$

При $\rho = 0, z = h, \tau_{\rho z} = 0$

$$\sigma_z = -\sqrt{2/[3(1-\alpha)]}\sigma_s, \quad (5)$$

при $\rho = 1, z = 0, \tau_{\rho z} = 0$

$$\sigma_\rho = -\sqrt{2\alpha^2/[3(1-\alpha)]}\sigma_s \quad (6)$$

Единая формула для определения удельной силы формования:

$$q = \left\{ \frac{\mu\alpha\beta(24 + \beta)ch(\sqrt{\beta}h)}{12[\sqrt{\beta}(8 + \beta)sh(\sqrt{\beta}h) - 4\mu(4 + \beta)(ch\sqrt{\beta}h - 1)]} + 1 \right\} \times \\ \times \sqrt{2/[3(1-\alpha)]}\sigma_s \quad (7)$$

где $\beta = [-(b + ah^2/2 - 1) + \sqrt{(b + ah^2/2 - 1)^2 + 4(4 - a)bh^2/2}]/(bh^2)$,

$$a = 4 - \alpha, \quad b = 1 - \alpha/16.$$

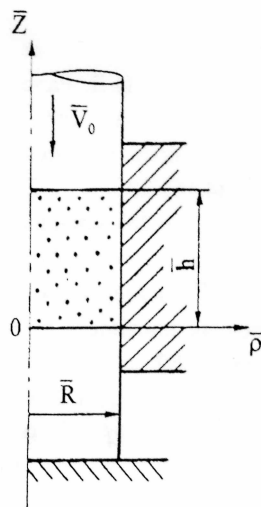


Рис. 2.

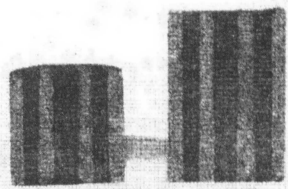


Рис. 3.

Использовали величины коэффициента боков α с давления, полученные И.Д. Радомысльским. По методике на стр. 12 получили приведенные на рис. 4 (1 – порошок ПЖВ4.160.28, 2 – порошок ПЖВ2.160.28) зависимости. Их можно аппроксимировать формулой: $\sigma_s = c\gamma^d$, где σ_s измеряется в МПа, γ – средняя плотность заготовки, в кг/м³. Для ПЖВ2.160.28 $C = 70,7 \times 10^{-12}$; $d = 3,34$; для ПЖВ4.160.28 $C = 102,8 \times 10^{-12}$, $d = 3,36$.

Все многофакторные экспериментальные исследования диссертант проводит, используя математическое планирование.

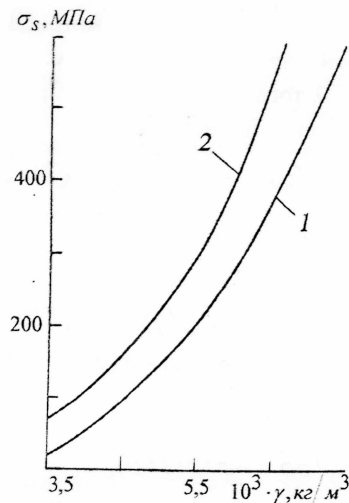


Рис. 4.

Обработка результатов экспериментов приводит в итоге к построению математической модели процесса. Простейшая модель имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (8)$$

где x – контролируемые входные факторы;

y – выходной фактор;

b_1, b_2 – коэффициенты, характеризующие влияние факторов x_1 и x_2 ;

b_{12} – коэффициент, характеризующий совместное влияние факторов x_1 и x_2 ;

b_0 – свободный член.

По результатам эксперимента проведен расчет коэффициентов математической модели.

Формула для расчета коэффициентов получена с использованием метода наименьших квадратов.

$$\Phi = \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2 = \min, \quad (9)$$

где y_u и $\hat{y}_u$ соответственно экспериментальные и рассчитанные по модели значения y в u -том опыте; N – общее число опытов.

При соблюдении условия ортогональности матрицы плана

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0, \quad i \neq j \quad (10)$$

и условия симметрии

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k \quad (11)$$

Коэффициенты модели рассчитывают по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (12)$$

где i - номер фактора.

Для обеспечения условий (10), (11) модель из натурального масштаба

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i + \sum_{i=1}^m b_u X_i^2 \quad (13)$$

переводят в кодированный масштаб

$$y = b'_0 + \sum_{i=1}^m b'_i x_i + \sum_{i=1}^m b'_{ii} z_i \quad (14)$$

В третьем разделе представлены теоретические исследования по определению величин напряжений при уплотнении порошковой заготовки в закрытой матрице и накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок в случаях осевого сжатия с одновременным прямым выдавливанием и осевого сжатия с одновременным радиальным выдавливанием.

Основные положения аналитического исследования состоят в выполнении последовательных шагов по следующему алгоритму:

1. Выбор модели схематизированной пористой заготовки, рис. 5.
2. Задание кинематически возможных полей скоростей

$$v_\rho = v_\rho(\rho, \theta, z);$$

$$v_\theta = v_\theta(\rho, \theta, z);$$

$$v_z = v_z(\rho, \theta, z).$$

3. Определение скоростей деформаций
4. Определение интенсивностей скоростей деформации
5. Решение уравнений связи с использованием результатов п. п. 3 и 4
6. Решение уравнений равновесия
7. Определение выражений для v_ρ, v_θ, v_z

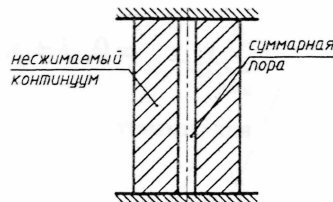


Рис. 5.

8. Определение накопленной деформации

$$\xi_i = \frac{de_i}{dt} = \frac{\partial e_i}{\partial t} + v_x \frac{\partial e_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial e_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial e_i}{\partial z},$$

9. Определение количества циклов для измельчения зерна.

10. Определение размеров очага пластической деформации $q = f(\sigma_s, \text{размеров изделия})$, используя принцип минимума удельной силы деформирования $q \rightarrow \min$.

11. Определение удельной силы деформирования.

Исследования осадки пористой заготовки в закрытой матрице, рис. 6, проводились с целью определения силы деформирования и выбора прессового оборудования.

Силы контактного трения $\tau_k = \mu \beta \sigma_s$

Кинематически возможная осевая скорость: $v_z = f(z)$ (15)

Из условия несжимаемости

$$\xi_z + \xi_\rho + \xi_\theta = 0 \quad (16)$$

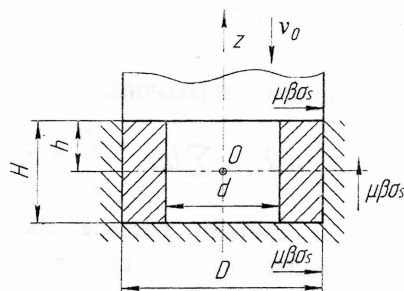


Рис. 6.

и граничного условия $v_\rho = 0$ при $\rho = D/2$ радиальная скорость

$$v_\rho = \frac{1}{2} \frac{\partial f(z)}{\partial z} \left(\rho - \frac{D^2}{4\rho} \right).$$

Скорости деформаций:

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_\rho &= \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} = \frac{1}{2} \frac{\partial f(z)}{\partial z} \left(1 + \frac{D^2}{4\rho^2} \right), \\ \xi_\theta &= \frac{v_\rho}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{\partial f(z)}{\partial z} \left(1 - \frac{D^2}{4\rho^2} \right), \\ \xi_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial f(z)}{\partial z}, \\ \eta_{\rho z} &= \frac{\partial v_\rho}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \rho} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2} \left(\rho - \frac{D^2}{4\rho} \right). \end{aligned} \right.$$

Уравнения связи

Леви-Мизеса :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_\rho &= \sigma + \frac{2}{3} \frac{\xi_\rho}{\xi_i}, \\ \sigma_\theta &= \sigma + \frac{2}{3} \frac{\xi_\theta}{\xi_i}, \\ \sigma_z &= \sigma + \frac{2}{3} \frac{\xi_z}{\xi_i}, \\ \tau_{\rho z} &= \frac{1}{3} \frac{\eta_{\rho z}}{\xi_i}, \end{aligned} \right. \quad (17) \quad (18)$$

где $\sigma = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z}{3}$ — среднее главное напряжение.

После усреднения по радиусу ρ интенсивности скоростей деформации она записана в виде $\xi_1 f(z)$.

Следовательно

$$\tau_{\rho z} = f_2(z) \left(\rho - \frac{D^2}{4\rho} \right). \quad (19)$$

Уравнения равновесия для данной задачи имеют вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0. \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{Из их решения: } \sigma_z = -2f_2(z)dz + f(\rho). \quad (21)$$

Анализ уравнений (17) показывает, что при $\rho \leq D/2$ максимальной по абсолютной величине скоростью деформации является ξ_ρ . Следовательно, наибольшим по алгебраической величине нормальным напряжением будет σ_ρ .

Это позволяет использовать следующие приближенные условия пластичности:

$$\sigma_\rho - \sigma_z = \beta \sigma_s \quad (22)$$

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \sigma_s \quad (23)$$

$$\text{При } \rho = d/2 \text{ и } z = 0 \quad \tau_{\rho z} = -\beta \sigma_s \mu_2$$

$$\text{при } \rho = d/2 \text{ и } z = h, \tau_{\rho z} = \beta \sigma_s \mu$$

Нормальные напряжения на поверхности контакта с верхним инструментом:

$$\sigma_z = -\beta \sigma_s - \beta \sigma_s \ln \frac{2\rho}{d} - \frac{C_5}{4} \left(\frac{d^2}{2} - 2\rho^2 + D^2 \ln \frac{2\rho}{d} \right), \quad (24)$$

$$\text{где } C_5 = \frac{2\beta \sigma_s d(\mu + \mu_2)}{(D^2 - d^2)h}.$$

Удельная сила осадки в матрице:

$$q = \beta \sigma_s \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{1 - (d/D)^2} \ln(d/D) + \frac{4\mu(h/D)}{1 - (d/D)^2} + \frac{(\mu + 0,5)(d/D)}{8(h/D)[1 - (d/D)^2]^2} \left\{ [(d/D)^2 - 3][1 - (d/D)^2] - 4 \ln(d/D) \right\} \right\}. \quad (25)$$

$$\text{Сила осадки полой заготовки: } P = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) q. \quad (26)$$

Исследование величин накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием с одновременным прямым выдавливанием проводилось по схеме на рис. 7.

Анализ проводился с разбиением очага пластической деформации разграничением на области 1 и 2. Для каждой из областей были определены кинематически возможные скорости течения при определенных граничных условиях.

Так для области 1 накопление деформаций частицами в процессе пластического деформирования выражается формулами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_{z1}}{\partial z} &= \frac{v_0}{h} \Psi, \\ \frac{\partial}{\partial \rho}(v_{\rho 1} \rho) &= -v_0 \frac{\Psi}{h} \rho, \\ v_{\rho 1} \rho &= -v_0 \frac{\Psi}{2h} \rho^2 + f(z), \\ v_{\rho 1} &= -v_0 \frac{\Psi}{2h} \rho + \frac{f(z)}{\rho}, \\ \text{где } f_1(z) &= v_0 \frac{\Psi}{2h} r_0^2. \end{aligned} \quad (27)$$

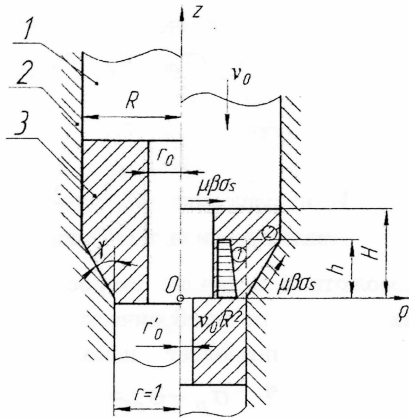


Рис. 7.

В условиях осевой симметрии скорости деформаций выражаются через компоненты тензора накопленных деформаций:

$$\begin{cases} \xi_z = \frac{\partial e_z}{\partial t} + v_\rho \frac{\partial e_z}{\partial \rho} + v_z \frac{\partial e_z}{\partial z}, \\ \xi_\rho = \frac{\partial e_\rho}{\partial t} + v_\rho \frac{\partial e_\rho}{\partial \rho} + v_z \frac{\partial e_\rho}{\partial z}, \\ \xi_\theta = \frac{\partial e_\theta}{\partial t} + v_\rho \frac{\partial e_\theta}{\partial \rho} + v_z \frac{\partial e_\theta}{\partial z}. \end{cases} \quad (28)$$

После соответствующих преобразований общая формула для определения накопленной деформации:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_z - e_\rho)^2 + (e_\rho - e_\theta)^2 + (e_\theta - e_z)^2} = 1,155 \sqrt{e_z^2 + e_z e_\theta + e_\theta^2}. \quad (29)$$

Из (29) вытекает, что накопленная деформация в выдавленной части заготовки равна:

$$e_i = 1,155 \ln \frac{R^2 - r_0^2}{1 - r_0^2}. \quad (30)$$

Аналогичным образом находятся выражения накопленных деформаций в области 2.

Проведено аналитическое исследование по определению величин накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием с одновременным радиальным выдавливанием по выбранной схеме на рис. 8.

В диссертации проведено исследование накопления деформаций в области А методом, аналогичным описанному выше применительно к схеме на рис. 7. Получена формула для расчета накопления деформации при осевом сжатии с одновременным радиальным выдавливанием. Величины накопленных деформаций дают возможность определения количества циклов деформирования заготовки по разрабатываемым схемам с целью измельчения зерен до заданного размера.

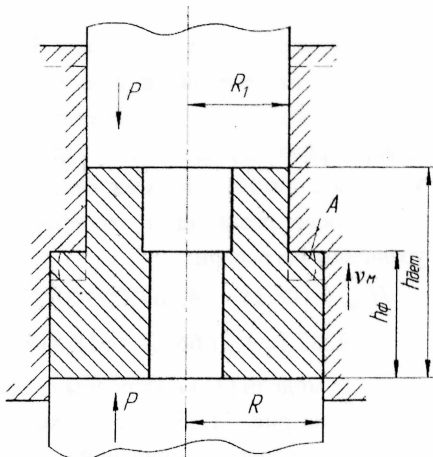


Рис. 8.

В четвертом разделе проводится исследование и разработка способов повышения плотности деталей, которые связаны с созданием схем пластического деформирования со сдвигами, с одновременным наложением импульсно-магнитного воздействия. Объектом исследования был железный порошок марки ПЖРВЗ.200.26.

Первая схема реализуется осевым сжатием с одновременным радиальным выдавливанием; $p_n = 850 - 900$ МПа.

Вторая схема: аналог первой (при $p_n = 300 - 350$ МПа), после чего следует осевое сжатие с одновременным прямым выдавливанием, рис. 9. В ходе исследования влияния схем деформирования на микротвердость были реализованы эксперименты, в которых также использовались воздействия на заготовку и на исходный материал магнитно-импульсной обработкой (МИО).

направлены не только на повышение плотности брикета (95-97% от теоретической плотности), но и на снижение градиента напряжения в заготовке, что положительно сказывается не только на снижении термических напряжений при процессах спекания, и на комплексе механических характеристик в целом.

Поскольку исследовались две схемы деформирования, содержащие различные значения сдвигов, необходимо было определить критерий, позволяющий описывать в количественном отношении эти воздействия. В качестве такого критерия предложен угол укладки зерен порошка β . Значения этого угла для каждой из предлагаемых схем был определен в ходе анализа полученного уравнения регрессии:

$$\beta = 36,092 - 42,413X_1 - 8,1833X_2 - 1,77X_3 - 1,53X_4 + \\ + 0,42X_5 - 22,0X_1^2 + 21,667X_2^2$$

Варьируемые факторы остались прежними, а отклик - значение угла β . Как видно из рис. 12, I схема характеризуется значением угла, который в максимальном своем выражении у образующей цилиндрической заготовки равен $37,6^\circ$; во II схеме он равен $34,1^\circ$.

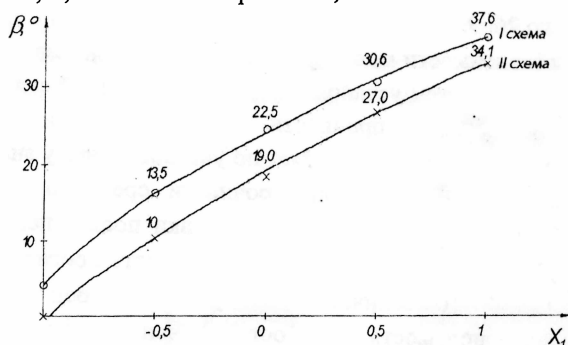


Рис. 12.

Высокая плотность, достигаемая в сформованных брикетах после реализации разрабатываемых схем, позволяет определять для неспекенного брикета сдвиговую прочность $\tau_{ср}$ по схеме на рис. 13. На схеме 1 - образец; 2 - нож; 3 - пуансон. До реализации разработанных схем это было невозможно из-за легкости разрушения образцов.

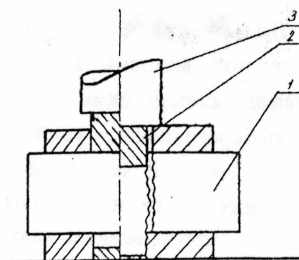


Рис. 13.

Величина касательного напряжения на поверхности среза τ_{cp}

определялась по формуле: $\tau_{cp} = \frac{F}{2S}$, (32)

где: F - фиксируемая величина нагрузки (максимальная), Н; $2S$ - две площади среза у образца, м².

В модель для исследования материала на сопротивление касательному напряжению резки в качестве варьируемых факторов вошли, кроме схемы деформирования (X_1): МИО порошка или заготовки (X_2 и X_3), X_4 - концентрация стеарата Zn, %; X_5 - концентрация добавки углерода C, %. После реализации эксперимента $2^{5//8}$ получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 21,64 + 6,39X_1 - 1,5X_2 + 1,66X_3 + 2,84X_4 - 4,7X_5 - 0,71X_1X_2$$

В уравнении откликом (y) является искомая величина τ_{cp} . По I схеме τ_{cp} равно 17, 12 МПа, реализация II схемы способствует повышению τ_{cp} до 29, 9 МПа. Использование дополнительного воздействия МИО порошка снижает показатели сдвиговой прочности при I схеме до 15, 18 МПа ; МИО заготовки до 12, 0 МПа; при II схеме до 26, 9 МПа и до 24,8 МПа соответственно.

Были установлены зависимости между углом укладки зерен в заготовке и показателями прочности. Так, путем установления корреляционной связи была определена зависимость сдвиговой прочности от угла укладки зерен в заготовке: $\tau_{cp} = 104,26 - 2,3\beta$, которая позволяет по установленному значению угла укладки зерен определить показатели прочности среза до спекания заготовки. Зависимость прочности порошковой заготовки после спекания от угла укладки зерен: $\sigma_s = 749,3 - 17,14\beta$ дает возможность прогнозировать свойства конечного изделия по величине угла укладки зерен на этапе сформованной заготовки. Зависимость прочности спеченного порошкового материала может быть спрогнозирована и по показателям сдвиговой прочности сформованной заготовки: $\sigma_s = -56,7 + 8,33\tau_{cp}$.

Пятый раздел посвящен разработанной технологии получения композитной мишени из размельченной в порошок титановой стружки, смешанной с порошком дисульфида вольфрама (WS_2). Целью разработанной ресурсосберегающей технологии является создание нанокompозитного покрытия деталей машин и инструмента. Диссертантом разработан процесс формования мишени, которая является заготовкой в технологии нанесения покрытий с применением вакуумной установки магнетронного типа.

Для определения режимов перемола, приводящих к необходимым размерам титанового порошка, проведена классификация стружки на 4 типа, рис. 14. Были сконструированы приспособления и инструмент для крупного дробления и мелкого перемола. Изготовлены мишени из крупноперемолотой стружки, рис. 15 и из тонкопомолотой стружки, рис. 16.

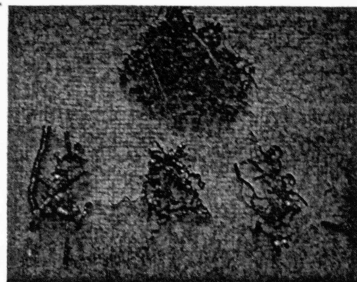


Рис. 14.



Рис. 15.

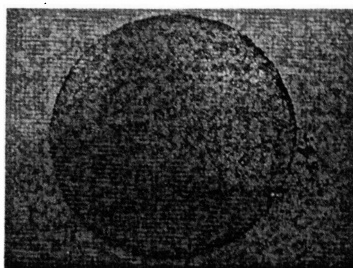


Рис. 16.

В дальнейшем с применением этих мишеней, помещенных в магнетрон устройство, нанесены нанокompозитные износостойкие самосмазывающихся покрытия на элементы подшипников качения, рис. 17.

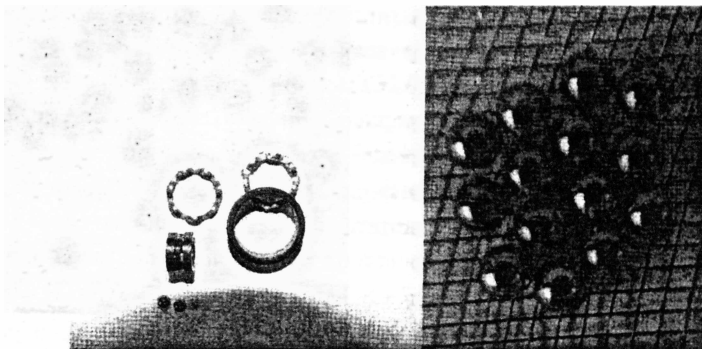


Рис. 17.

Для оценки полученного покрытия необходимо определить коэффициент «сухого трения». Результаты испытаний приведены на рис. 18.

Полученные данные по значению коэффициента «сухого трения» показывают, что покрытие из композиции $Ti + WS_2$ (порошок чистого титана и дисульфид вольфрама), обеспечивает снижение коэффициента в 2 раза по сравнению с образцом без покрытия. В случае композиции $TiN + WS_2$ это снижение в 2,3 раза.

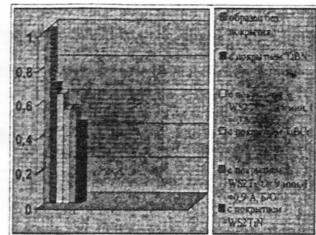


Рис. 18.

В развитие применения схем пластического деформирования, содержащего сдвиги, разработан технологический процесс изготовления детали типа «стакан» методом холодной объемной штамповки из БрБ2 с созданием активных сил контактного трения. Проведена подготовка сплава путем перевода его из двухфазного в



Рис. 19.

однофазное состояние путем закалки с температуры $870^\circ C$ в воду.

Построение диаграммы напряжений для образцов до термической обработки и после выявило следующие результаты, рис. 19. На рис. 19 ряд 1 до; ряд 2 после термической обработки. Снижение сопротивления пластической деформации позволило для данного изделия (материал БрБ2) заменить горячую штамповку на холодную объемную штамповку с активными силами трения, рис. 20.

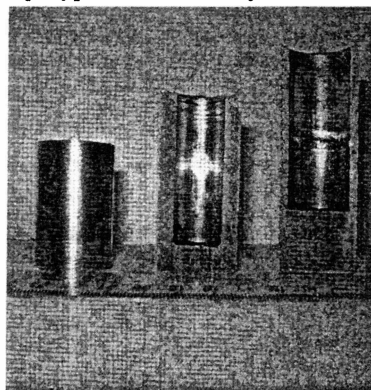


Рис. 20.

Шестой раздел посвящен анализу серийно выпускаемого оборудования. Для реализации рассмотренных схем требуются прессы, позволяющие разместить на них технологическую оснастку с большой высотой засыпной камеры, имеющие большие хода рабочих органов, на которых устанавливаются пуансоны, относительно большую силу принудительного перемещения матрицы (по сравнению с силой на пуансоне). Отсутствие серийно выпускаемого оборудования, предназначенного изначально для

реализации разработанных схем деформирования, вызвало проведение анализа возможностей модернизации выпускаемого оборудования. По каждой из выбранных марок прессов, принадлежащих к разным типам: механические, механогидравлические, гидравлические, показано, в чем должна состоять такая модернизация.

Для механических прессов фирмы "Dorst" необходимы новые пресс-блоки.

Механогидравлическому прессу фирмы «Yoshizuka» требуется корректировка программного обеспечения управления прессом или смена пресс-блока.

Пресс фирмы " Mannesmann - Pulvermetall " может "переходить" к другой операции через изменение в положении конечных выключателей.

Гидравлические прессы типа ПА выполняют другую технологическую операцию после установки новой программы управления прессом.

Рассмотрены вопросы оборудования, предназначенного для измельчения стружечной массы. Разработана научно-обоснованная методика выбора прессового и вспомогательного оборудования для получения цилиндрических заготовок из металлических порошков и их смесей. Разработана конструктивная схема специализированного гидравлического пресса для реализации разработанных схем деформирования. В настоящее время этот специализированный пресс изготавливают на ОАО «Тяжпрессмаш» (г. Рязань).

Приложения включают результаты проведенных анализов в ИМЕТ им. А.А. Байкова по определению состава измельченного порошка из титановой стружки; техническое задание (Т32.00744002-171-2008) на разработку, изготовление и поставку пресса гидравлического силой 5600 кН, модель РПГ37; созданный в результате проведенного анализа перечень оборудования, рекомендуемого для измельчения, смешения порошковой шихты; акты апробации полученных результатов диссертационной работы в промышленности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате теоретического анализа показана возможность использовать условие несжимаемости и условие пластичности, применяемые при анализе деформирования компактных заготовок, при проектировании рассматриваемых операций штамповки для расчета кинематического и напряженного состояний пористой заготовки. Как следствие такого подхода в диссертации теоретически определены удельные силы, необходимые для

формования со сдвигами высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок.

2. В развитие этого метода предложено и реализовано в проведенном исследовании моделирование пористости деформируемой заготовки в виде единой макропоры, имеющей вид размещенной вдоль оси симметрии заготовки цилиндрической полости. На основании указанной схематизации в диссертации выведены зависимости накопления деформаций на стадиях последовательной пластической обработки заготовки чередованием операций осевого и радиального ее выдавливания с одновременным созданием давлений на торцы заготовки.

В результате анализа показана возможность для установленных специалистами в области нанотехнологий величин накопленных деформаций, приводящих к требуемому измельчению структуры, определить количество циклов чередования последовательных операций, предусмотренных разработанным методом деформирования заготовки.

3. Экспериментальными исследованиями установлено влияние схем деформирования со сдвигами на микротвердость, определено геометрическое распределение микротвердостей в меридиональной плоскости заготовок, которое существенно зависит от применяемой схемы деформирования.

4. Показано, что, применяя магнитно-импульсную обработку исходного порошка и сформованной порошковой заготовки, можно управлять распределением микротвердости в ней. На основе изучения распределения микротвердости в плоскости заготовки построена математическая модель, позволяющая рассчитать значения микротвердости в различных точках образца в зависимости от схемы деформирования, магнитно-импульсной обработки сформованной заготовки или порошка. Разработаны методики и инструмент для экспериментального определения для сдвиговой прочности материала неспеченной заготовки.

5. Предложен новый критерий эффективности схем деформирования в виде угла укладки зерен частиц порошка (β). Установлена связь этого критерия со сдвиговой прочностью (τ_{cp}) неспеченных формованных заготовок и прочностью детали после спекания.

6. В результате анализа серийно выпускаемого оборудования с целью его применения для реализации предложенных схем деформирования показана целесообразность создания специализированных прессов для выполнения рассмотренного деформирования порошковых заготовок. В диссертации разработана конструктивная схема специализированного гидропресса для

промышленной реализации изучаемых процессов формирования порошковых заготовок.

7. Для автоматизированного проектирования технологических процессов формирования высокоплотных цилиндрических заготовок с управлением их структурой и свойствами разработана система автоматизированного выбора марки порошка, технологических параметров операции его формирования и марки прессы для изготовления изделий с применением механических схем формирования, использующих интенсивные сдвиги.

8. Проведенные исследования нашли практическое применение при разработке технологических процессов производства высокоплотных порошковых деталей. В частности, разработан технологический процесс формирования композитных распыляемых мишеней на основе переработанной титановой стружки (Ti) и порошка дисульфида вольфрама (WS_2), также разработан технологический процесс производства втулок из бериллиевой бронзы и другие технологические процессы. В результате апробации результатов работы на промышленных предприятиях получены акты с ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», с Завода экспериментального машиностроения РКК «Энергия» им. С.П. Королева, из ГУП «Конструкторское бюро приборостроения», из ФГУП ГНПП «Сплав», из ОАО «ТНТИ» из ОАО «Военно-Промышленная Корпорация «Научно-производственное Объединение Машиностроения», из Центрального Научно-Исследовательского Технологического института Машиностроения (ЦНИТИМ), ОАО Научно-производственное предприятие «ГАЗОСВАРОЧНЫЕ АППАРАТЫ - XXI век». В актах отмечены эффективность проведенных исследований и их перспективность для развития отечественного машиностроения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Коробова Н.В., Дмитриев А.М. Определение силы формирования высокоплотных порошковых цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1994. - № 7-9. - С. 113-117.

2. Коробова Н.В. Повышение прочности порошковых деталей путем формирования со сдвигами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1994. - №7-9. – С. 117-121.

3. Сулиман М., Мусса Г., Коробова Н.В. Точность размеров оболочек при холодном выдавливании на трехвалковых ротационных машинах // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. - №7. – С. 21-23.

4. Сулиман М., Мусса Г., Коробова Н.В. Влияние технологических и конструкторских факторов на точность размеров тонкостенных оболочек, получаемых ротационным выдавливанием // Кузнечно-штамповочное производство. - 2000. - №12. - С. 6-7.
5. Богданов Э.Ф., Коробова Н.В. Прямой метод определения калориметрической температуры горения топлива // Кузнечно-штамповочное производство. - 2000. - №12. - С. 24-26.
6. Богданов Э.Ф., Коробова Н.В. Экономия природного газа при работе нагревательных печей // Кузнечно-штамповочное производство. - 2002. - №2. - С. 31-37.
7. Богданов Э.Ф., Коробова Н.В. Экономия газа и мазута при работе нагревательных печей с обогащением воздуха кислородом // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2002. - №4. - С. 66-73.
8. Богданов Э.Ф., Коробова Н.В. Тепловой баланс и теплотехнические показатели нагревательных печей // Заготовительные производства в машиностроении. - 2003. - №2. - С. 22-25.
9. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л., Коробова Н.В. Течение и формоизменение частиц металла в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского технического университета им. Г.И. Носова. - 2004. - № 4. - С. 36-43.
10. Воронцов А.Л., Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Прогнозирование макроструктуры штампованных изделий // Заготовительные производства в машиностроении. - 2005. - № 5. - С. 37-43.
11. Воронцов А.Л., Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Расчет волокнистой структуры выдавливаемых стаканов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2005. - № 7. - С. 30-36.
12. Воронцов А.Л., Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Расчет сложных элементов макроструктуры выдавливаемых стаканов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2005. - № 9. - С. 24-28.
13. Воронцов А.Л., Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Волокнистая структура в стенке выдавливаемых стаканов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2005. - № 12. - С. 23-27.
14. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л., Коробова Н.В. Сжатие полой цилиндрической заготовки в закрытой матрице // Заготовительные производства в машиностроении. - 2006. - № 3. - С. 33-37.
15. Коробова Н.В. Отчет о XII ежегодной научной сессии РАН в области заготовительных производств машиностроения // Заготовительные производства в машиностроении. - 2006. - № 7. - С. 52-54.

16. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Определение накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок обработкой давлением // Металлообработка. – 2008. - №6. – С. 44-49.
17. Коробова Н.В. Исследование величин напряжений при уплотнении порошковой заготовки в закрытой матрице // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. – Тула, 2008. – С. 65-72.
18. Коробова Н.В. Исследование величин накопленных деформаций при измельчении зерен порошковых заготовок осевым сжатием с одновременным прямым выдавливанием // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. – Тула, 2008. – С. 113-123.
19. Коробова Н.В. Получение детали типа «Стакан» методами холодной объемной штамповки из БрБ2 по схемам с активными силами контактного трения // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. – Тула, 2008. – С. 132-136.
20. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Технология образования поверхностного слоя спеченных порошковых заготовок // Механика и технология в процессах формоизменения с локальным очагом пластической деформации: Тез. докл. Международного научно-технического симпозиума. – Орел, 1997. – С. 9-10.
21. Ступников В.П., Коробова Н.В. Механизм упруго-пластических деформаций при воздействии импульсно-магнитной обработки давлением на материалы // Механика и технология в процессах формоизменения с локальным очагом пластической деформации: Тез. докл. Международного научно-технического симпозиума. – Орел, 1997. – С. 35-36.
22. Коробова Н.В. Разработка методики проектирования процессов формирования высокоплотных порошковых деталей // Итоги развития механики в Туле: Тезисы докладов международной конференции. - Тула, 1998. – С. 36-37.
23. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Ступников В.П. Прогрессивные технологии и оборудование для производства деталей из порошков на железной основе // Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем и социально-экономические проблемы производства. Труды Всероссийской научно-технической конференции. - Калуга, 1998. - С. 74-76.
24. Ступников В.П., Коробова Н.В. Механизм упруго-пластических деформаций при воздействии импульсной обработки давлением на материалы // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всерос. научно-технической конф. - М., 1998. - С. 137-138.

25. Коробова Н.В. Обеспечение качества поверхностного слоя спеченных порошковых заготовок // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всерос. научно-технической конференции. - М., 1998. - С. 138-139.
26. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Ступников В.П. Основы теории операций формования деталей из железных порошков // Современные проблемы прочности. Тез. докл. III Международного семинара им. В.А. Лихачева. - Великий Новгород, 1999. - С. 299-302.
27. Коробова Н.В., Ступников В.П. Исследование материала на сдвиговую прочность // Современные проблемы прочности. Тезисы докладов III Международного семинара им. В.А. Лихачева. - Великий Новгород, 1999. - С. 303-306.
28. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Ступников В.П. Новые экологические чистые технологические способы обработки материалов и энергосбережение топливных ресурсов // Энерго- и ресурсосберегающие технологии в городском хозяйстве. Тез. докл. городской научно-практической конференции. - М., 1999. - С. 23.
29. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Ступников В.П. Исследование технологии изготовления изделий из создаваемых в процессе их производства композиционных материалов на основе железного порошка при спекании электрическим током // Научные исследования высшей школы в области приоритетных направлений науки и техники: Тез. докл. по материалам отчетных конференций. - М., 2001. - С. 23.
30. Коробова Н.В., Легчилин А.И., Ступников В.П. Определение возможности холодного прессования заготовок из титановой стружки // Современные проблемы прочности: Сборник научных трудов IV Международного симпозиума им. В. А. Лихачева, г. Старая Русса. - Великий Новгород, 2003. - С. 253-257.
31. Коробова Н.В., Берстнев М.В. Исследование технологических возможностей холодного прессования титановой стружки // Металлофизика, механика материалов и процессов деформирования материалов: Тез. 2 Международной научно-технической конф. - Самара, 2004. - С. 27.
32. Балахонцева Н.А., Коробова Н.В., Ступников В.П. Исследование уплотнения металлических порошков при одноосном сжатии // Образование через науку: Тез. докл. Международной конф. - М., 2005. - С. 221-222.
33. Коробова Н.В. Технологический процесс изготовления методами холодной объемной штамповкой мишеней для нанесения износостойких композиционных покрытий на основе титановой стружки на режущий инструмент // Кузнечно-штамповочное производство: перспективы и развитие: Сборник научных трудов. - Екатеринбург, 2005. - С. 339-343.

34. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Специализированные гидравлические прессы для производства нанопорошковых заготовок // Кузнечно-штамповочное производство: перспективы и развитие: Сборник научных трудов.- Екатеринбург, 2005. – С. 382-385.

35. Формирование комбинированных упрочняющих покрытий методом распыления композитной мишени / А.И. Беликов, Н.В. Коробова, И.И. Никонов, М.В. Берстнев // Высокие технологии в промышленности России: Тез. докл. XI Международной научно-технической конф. – М., 2005. – С. 520-522.

36. Коробова Н.В. Технология получения детали типа «стакан» методами холодной объемной штамповки из бериллиевой бронзы БрБ2 с применением схем с активными силами контактного трения // Прогрессивные Технологии и оборудование в машиностроении и металлургии: Сборник научных трудов Международной научно-технической конф. - Липецк, 2006. – С.142-146.

37. Коробова Н.В. Получение детали типа «стакан» методами холодной объемной штамповки из БрБ2 по схемам с активными силами контактного трения // «Авиакосмические технологии «АКТ-2006»: Труды Седьмой Международной научно-технической конф. - Воронеж, 2006. - С. 132-136.

38. Коробова Н.В., Берстнев М.В. Изготовление мишеней для нанесения износостойких композиционных покрытий на основе титановой стружки на инструмент различного назначения // Авиакосмические технологии «АКТ-2006»: Труды Седьмой Международной научно-технической конф. – Воронеж, 2006. - С. 136-146.

39. Формирование комбинированных упрочняющих покрытий вакуумными ионными методами / А.И. Беликов, Н.В. Коробова, И.И. Никонов, М.В. Берстнев // Пленки и покрытия. Труды 8-ой международной конф. - СПб. - 2007. - С. 77-81.

40. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Производство деталей из порошковых материалов на железной основе холодным выдавливанием спеченных заготовок // Технология легких сплавов. - 2008. - №2. – С. 86-95.

41. Коробова Н.В. Малогабаритные многофункциональные гидравлические прессы // Машиностроительные технологии. Сборник тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции.– М., 2008. – С. 119-121.

42. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Производство деталей из порошковых материалов на железной основе холодным выдавливанием спеченных заготовок // Технология легких сплавов. – 2008. - №4. – С. 86-95.

43. Богданов Э.Ф., Коробова Н.В. Методические указания по расчету нагревательных устройств кузнечно-штамповочного производства. – М. 1998. – 24с.

44. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Ступников В.П. Методы факторного планирования эксперимента в обработке давлением: Учебное пособие для вузов. - М., 1999.- 105с.

45. Богданов Э.Ф., Коробова Н.В. Тепловой баланс и теплотехнические показатели нагревательных печей: Учебное пособие по курсу «Нагрев и нагревательные устройства». – М., 2004. – 44с.

46. Богданов Э.Ф., Коробова Н.В. Тепловой баланс и теплотехнические показатели нагревательных печей: Учебное пособие по курсу «Нагрев и нагревательные устройства». – М., 2005. – 38с.

47. Гречников Ф.В., Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Специализированные прессы для обработки материалов давлением и их технологическое применение: Учебное пособие. – Самара, 2007.– 112с.

Подписано к печати 26.05.09. Заказ № 369
Объем 2,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
263-62-01