

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Мазуров Сергей Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК
ИЗ ПОРОШКОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ
НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия
и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и в ОАО «Центральный научно-исследовательский институт материалов»

Научный руководитель: Цеменко Валерий Николаевич
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: Мертенс Карл Карлович
доктор технических наук, профессор кафедры
машин и технологии обработки металлов давлением
СПбГПУ
Калинин Юрий Григорьевич
кандидат технических наук, начальник лаборатории
порошковой металлургии ЗАО «Завод «Композит»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт» (Технический университет)

Защита состоится ____ апреля 2013 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, СПб, ул. Политехническая, д.29, главное здание, ауд. 118.

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

Автореферат разослан ____ марта 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.03,
кандидат технических наук

Климова О.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Быстрорежущие стали используют в качестве инструментальных материалов для изготовления практически всех видов режущего инструмента. На современном этапе развития машиностроительного комплекса наращивание объемов производства металлорежущего инструмента становится малоэффективным. На первый план выдвигаются требования к совершенствованию технологии получения быстрорежущей стали с целью повышения качества изготавливаемого из нее инструмента.

Производство быстрорежущей стали методами порошковой металлургии открыло новые резервы для дальнейшего повышения эксплуатационных свойств инструмента за счет дополнительного легирования и измельчения структуры материала. Высокая скорость охлаждения металла в процессе распыления позволяет получать материал с повышенным содержанием легирующих элементов и весьма однородной структурой, в том числе добиться измельчения карбидов и повысить их однородность. Выполнение условий исходной чистоты порошков быстрорежущей стали и сохранения чистоты металла на всех стадиях передела порошка в готовые изделия позволяет получать режущий инструмент со стойкостью, которая превышает в 2—3 раза стойкость инструмента, получаемого из литых заготовок того же химического состава.

Отечественная технология горячей экструзии порошковых быстрорежущих сталей разрабатывалась в УкрНИИ Спецсталь и ЦНИИ Материалов. Ее особенностью является совмещение двух операций (уплотнения и деформации) в одну – горячую экструзию порошка в стальной оболочке и возможность использования более производительного оборудования (горизонтальных прессов), в отличие от шведской технологии горячего газостатического прессования.

Несмотря на то, что сведения о разработке процесса экструзии порошковых быстрорежущих сталей начали появляться еще в 70-х годах XX века, он не получил широкого распространения в нашей стране вплоть до настоящего времени по ряду причин. Следует признать тот факт, что параметры процесса экструзии в ранее проводимых работах в основном подбирались опытным путем, который является довольно трудоемким и дорогим. Для решения подобных задач в настоящее время

могут применяться методы компьютерного моделирования процессов, а большой опыт, накопленный ЦНИИ Материалов в области получения порошковых материалов способом экструзии, является экспериментальной основой для проведения научно-исследовательской работы в области горячей деформации порошковых капсулированных заготовок.

Таким образом, исследование и моделирование основных технологических этапов получения заготовок из порошковой быстрорежущей стали с целью их промышленного использования для изготовления инструмента является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит производить отечественный режущий инструмент с высоким комплексом механических, технологических и функциональных свойств.

Цель работы: разработка практических рекомендаций по совершенствованию технологии производства порошковой быстрорежущей стали, включая этапы получения порошка, горячей экструзии и последующей пластической и термической обработки заготовок.

В работе решались следующие **задачи:**

- Отработка способа центробежного распыления и режимов получения порошков быстрорежущей стали на основе моделирования процесса охлаждения частиц.
- Компьютерное моделирование процесса экструзии порошковой быстрорежущей стали 10P6M5-МП в оболочке и биметаллической заготовки с сердечником из стали 50XФА.
- Экспериментальная реализация процесса экструзии заготовок в производственных условиях, исследование структуры и свойств порошковой стали 10P6M5-МП после процесса экструзии, а также последующей пластической и термической обработки.
- Разработка практических рекомендаций для промышленной реализации технологии получения порошковой быстрорежущей стали 10P6M5-МП.

Научная новизна диссертационной работы:

1. На основе математического моделирования и расчетно-теоретического анализа процесса охлаждения и кристаллизации частиц установлены конструктивно-технологические параметры центробежного распыления быстрорежущей стали,

обеспечивающие получение заданной структуры и гранулометрического состава порошка.

2. Экспериментально изучено влияние глубины вакуума, температуры и химического состава порошков быстрорежущей стали на характер процессов газовыделения в порошках при вакуумной дегазации. Показано, что восстановление содержащихся в порошке оксидов и удаление оксидных пленок происходят при температурах 1000-1100°С.
3. Методом компьютерного моделирования проанализированы стадии уплотнения и деформации порошка быстрорежущей стали в оболочке. Установлены количественные значения технологических параметров (вытяжка и угол матрицы), обеспечивающие равномерность уплотнения и исключающие разнотолщинность оболочки за счет снижения неравномерности деформации компонентов.
4. Проанализирован характер влияния степени уплотнения порошковой быстрорежущей стали на процесс течения компонентов биметаллической заготовки при экструзии. Методом компьютерного моделирования установлены соотношение диаметров сердечника и порошкового слоя, а также толщина нижней крышки капсулы, которые обеспечивают заданное соотношение компонентов в готовом прутке.
5. Показано, что повышение прочностных свойств порошковой быстрорежущей стали при использовании предлагаемых технологических режимов изготовления заготовок достигается благодаря сохранению в структуре конечного прутка равномерного распределения легирующих элементов и, как следствие, формированию в структуре равномерно распределенных карбидов относительно небольшого размера и однородной мелкозернистой структуры аустенитного зерна после закалки. При этом отсутствие в структуре материала остаточной пористости позволяет исключить необходимость использования больших деформаций заготовки при экструзии.

Практическая значимость результатов работы:

1. Результаты исследований характера уплотнения порошковых быстрорежущих сталей при экструзии могут быть использованы при отработке основных этапов технологии получения заготовок из этих сталей в промышленных условиях. Рекомендованы технологические режимы производства прутков из порошковой

быстрорежущей стали, позволяющие существенно снизить отходы и, как следствие, стоимость заготовки.

2. Спроектирована и изготовлена опытная установка для получения металлических порошков способом центробежного распыления, позволяющая распылять металлические порошки заданного гранулометрического состава, на которую получен патент РФ №85382. Результаты исследования процесса центробежного распыления и полученных на опытной установке порошков могут быть использованы при проектировании промышленной установки.
3. Предложен метод высокотемпературного восстановительного отжига порошков быстрорежущей стали, позволяющий снизить содержание кислорода в них до допустимых пределов.
4. Спроектированы и запатентованы новые типы капсул (патенты РФ №81111 и №87374) для получения прутков из порошков быстрорежущей стали и для горячей экструзии биметаллических прутков.

В промышленных условиях предприятия ОАО «Полема» реализован процесс экструзии по предлагаемым технологическим режимам, получена опытная партия экструдированных заготовок. После горячей пластической деформации и стандартной термической обработки получены прутки, предел прочности которых в 1,5 – 2 раза превышает предел прочности быстрорежущей стали стандартной технологии производства.

Апробация результатов работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: 9-ой Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», 29-30 сентября, Минск, 2010; Международной научно-практической конференции «XXXIX Неделя науки СПбГПУ», 6-11 декабря, СПб, 2010; Международной научно-технической конференции «НФМ'10», 22-24 сентября, СПб, 2010; 9-ой Международной научно-технической конференции «СММТ'11», 22-24 июня, СПб, 2011; 2-ой Международной научно-технической конференции «НФМ'12», 27-29 июня, СПб, 2012.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, из них 4 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК; получено 3 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, списка литературы из 152 наименований. Работа изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка и 18 таблиц, 4 приложения.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры «Пластическая обработка металлов» СПбГПУ, а также работникам лаборатории 319 и отдела 123 ЦНИИ Материалов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность и обоснована цель проведенных исследований, сформулированы задачи, научная новизна и практическое значение диссертационной работы.

В первой главе работы представлен аналитический обзор литературы, рассмотрены основные способы получения быстрорежущих сталей. Показаны преимущества порошкового способа получения быстрорежущих сталей: возможность получения более мелкозернистой и однородной структуры благодаря высокой скорости охлаждения частиц в процессе кристаллизации.

Рассмотрены основные методы получения порошков быстрорежущих сталей, среди которых наиболее широко распространен метод газового распыления. Показано, что применение метода центробежного распыления является перспективным, поскольку этот метод позволяет значительно снизить энергоемкость и стоимость установки распыления, сузить гранулометрический состав порошков, а также исключить дефекты, характерные для метода газового распыления. Однако разработка технологии центробежного распыления требует дополнительных исследований, проектирования и изготовления оборудования.

Рассмотрены основные методы горячего уплотнения порошков, среди которых основными в настоящее время являются горячее изостатическое прессование (ГИП) и горячая экструзия (ГЭ). Способ ГИП наиболее распространен в Европе и США. Однако этот способ требует применения дорогостоящих и сложных в техническом оснащении изостатов. Для ГИП характерны значительная продолжительность выдержки заготовки при высоких температуре и давлении (3...5 час.), а также общая

длительность процесса уплотнения (до 15 час.). Способ горячей экструзии порошкового материала в оболочке представляет наибольший интерес: для этого способа применяются более производительные прессы. Кроме того, процесс экструзии обеспечивает значительно большие сдвиговые деформации (в сравнении с ГИП), которые способствуют прочному соединению порошковых частиц между собой.

Основным недостатком метода ГЭ быстрорежущих сталей, реализованного в ЦНИИ Материалов, являлся низкий выход годного (70% и менее) после механического удаления металлической оболочки. Следовательно, необходимо на основе анализа процесса уплотнения и деформации порошкового материала в оболочке установить количественное соотношение технологических параметров, которое снижает разнотолщинность оболочки вследствие высокой неравномерности деформации компонентов (оболочка – порошковый материал).

Во второй главе для выявления кинетики распыления и охлаждения частиц проведено компьютерное моделирование процесса затвердевания жидкой капли быстрорежущей стали при охлаждении в газовой среде, в воде и на медном экране. Геометрическая модель частицы представлена на рис. 1. При моделировании были использованы следующие исходные данные для инструментальной стали марки Р6М5: плотность, теплоемкость, теплопроводность, теплота затвердевания, спектр твердой фазы и спектр температур в интервале затвердевания, температура ликвидуса – 1400°C , температура солидуса – 1300°C , температура стали при разливке – 1600°C .

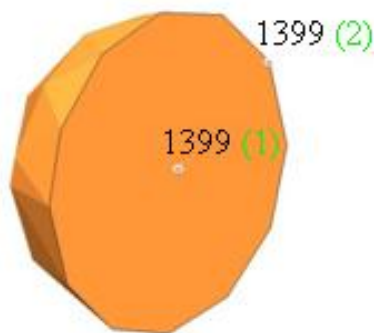


Рис. 1. Геометрическая модель частицы

Расчет произведен с применением программного пакета «Полигон», разработанного сотрудниками ЦНИИ Материалов и позволяющего решать широкий класс тепловых задач. Показана перспективность использования распыления металла в жидкость с последующим охлаждением полученных частиц на медном экране (рис. 2). При этом температурный градиент по сечению охлаждаемой частицы не превышал 5°C .

Получаемые частицы должны иметь сферическую форму, поскольку время сфероидизации существенно меньше времени охлаждения до температуры солидус. На основании полученных данных установлены конструктивно-технологические параметры центробежного распыления порошка быстрорежущей стали: угловая скорость вращения и диаметр распылителя, диаметр камеры распыления. Спроектирована и запатентована опытная установка центробежного распыления металлических порошков.

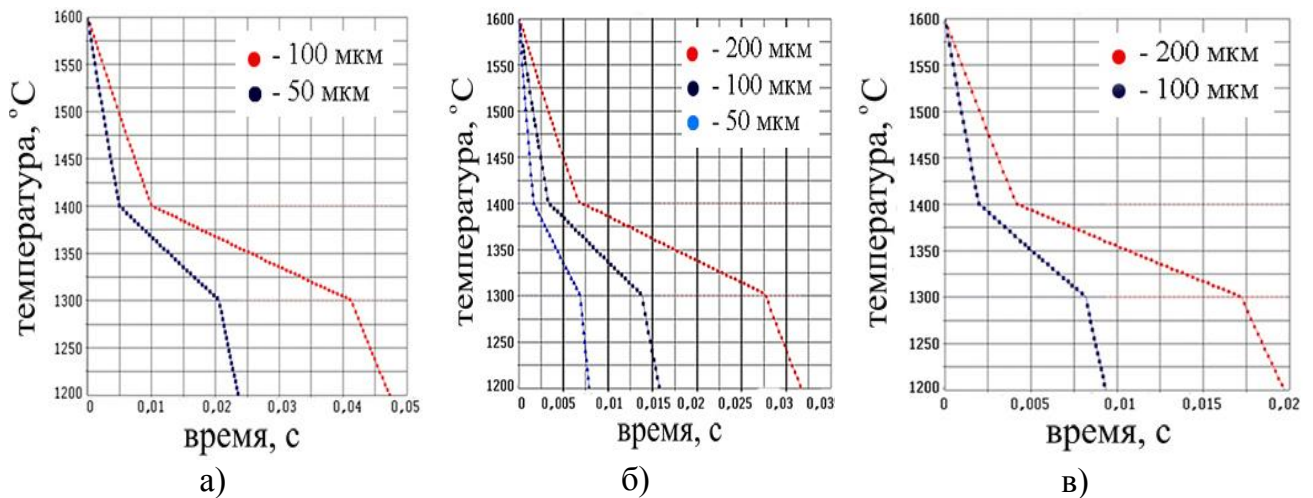


Рис. 2. Скорость охлаждения частиц в различных средах:
а) при газовом распылении; б) в воде; в) на медном экране

Проведен сравнительный анализ характеристик порошка быстрорежущей стали газового распыления производства ОАО «Полема» (г. Тула) и опытной партии порошка центробежного распыления, полученного на опытной установке, изготовленной совместно с ЦНИИ Материалов (рис. 3). Метод газового распыления позволяет получать частицы порошков быстрорежущей стали с высокодисперсной структурой (соответствует 14 баллу зерна). Гранулометрический состав порошка приведен в табл. 1, его относительная плотность утряски составляет $\Theta=0,62$. Сравнительно высокое содержание мелкой фракции в таких порошках может негативно влиять на прессуемость изделий и приводить к повышенной пористости получаемых прутков. Более того, мелкие порошки в большей степени адсорбируют на своей поверхности инородные газы и частицы, являясь источником повышенного загрязнения порошков.

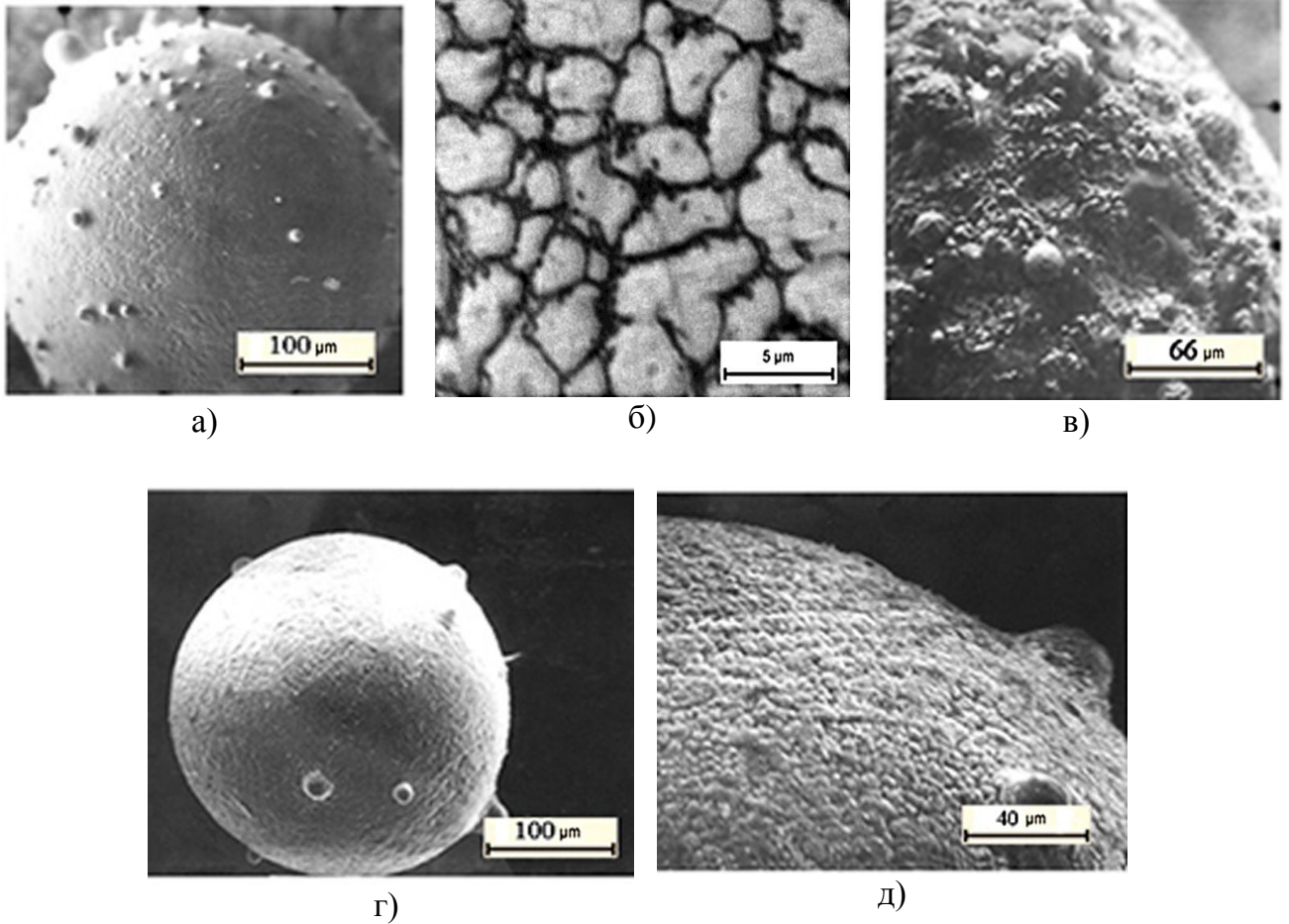


Рис. 3. Порошки стали 10P6M5-МП. Частицы газового распыления: а) внешний вид, б) микроструктура, в) зашлакованная частица. Частицы центробежного распыления: г) внешний вид, д) поверхность частицы

Т а б л и ц а 1

Гранулометрический состав порошка стали 10P6M5 газового распыления

Содержание фракций, % (масс.), мкм				
+315	-315+200	-200+100	-100+50	-50
10,0%	32,0%	55,5%	2,0%	0,5%

В распыленном газом порошке могут встречаться инородные включения и отдельные окисленные частицы, которые существенно снижают качество получаемой продукции (см. рис. 3 в). Во избежание этого недостатка рекомендовано принимать особо тщательные меры по очистке порошков от инородных включений.

При центробежном распылении применение составной среды охлаждения порошков (газовая и жидкая) позволило значительно повысить скорость охлаждения частиц (рис.2 а,б). Это позволило существенно уменьшить габариты установки распыления. За счет сфероидизации частиц в газовой среде получаемые порошки имели сферическую форму, которая является благоприятной для методов горячего уплотнения порошковых материалов, в отличие от порошков, распыленных жидкими энергоносителями. В процессе реализации технологии центробежного распыления были получены порошки с более гладкой формой частиц в сравнении с порошком газового распыления (рис.3 а,г). При этом средний размер частиц отличался в большую сторону: количество фракции 200–800 мкм составляло 82% (масс.) (табл. 2), относительная плотность утряски $\Theta=0,64$. Благодаря этим характеристикам можно повысить прессуемость изделий из порошков такого типа и понизить энергозатраты при уплотнении.

Т а б л и ц а 2

Гранулометрический состав порошка стали 10P6M5 центробежного распыления

Содержание фракций, % (масс.), мкм				
+800	-800+400	-400+315	-315+200	-200+100
5,3	42,12	20,41	19,61	10,93

Центробежно-распыленные порошки являются более загрязненными по кислороду в сравнении с газораспыленными порошками. Содержание кислорода в порошке при центробежном распылении составило 0,32 % (масс), поэтому применение дополнительных методов очистки является обязательным для порошков данного способа получения.

Методом масс-спектрометрии в интервале температур от 500 до 1100°C экспериментально определены температурные интервалы газовыделения и состав газовой фазы. Показано, что восстановление содержащихся в порошке оксидов и удаление оксидных пленок с поверхности порошка происходит при температурах 1000...1100°C за счет взаимодействия с содержащимся в исходном порошке избыточным углеродом, входящим в состав стали 10P6M5-МП. Этот процесс может

происходить как в вакууме, так и в замкнутой воздушной атмосфере в присутствии геттера.

На основании полученных результатов предложен метод очистки порошков быстрорежущей стали различных способов получения, основанный на восстановлении содержащихся в порошке оксидов, и удалении оксидных пленок с поверхности частиц. Содержание кислорода в порошке центробежного распыления удалось понизить в четыре раза. Очистку порошков можно совместить с операцией вакуумного отжига, применяемой для повышения пластичности порошков.

Проведенные исследования центробежного способа распыления порошков быстрорежущей стали предложены для разработки промышленной установки и внедрения этого метода в производственных условиях.

В третьей главе методом компьютерного моделирования исследован процесс уплотнения порошковой стали 10P6M5-МП в деформируемой оболочке. Использован программный продукт «*MultiDef*», разработанный на кафедре «Пластическая обработка металлов» СПбГПУ. Модель исследуемой капсулы представлена на рис. 4.

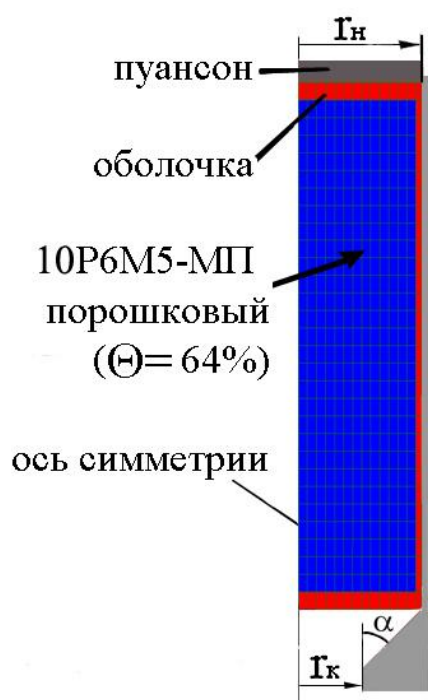


Рис. 4. Модель капсулы с порошком

Механические свойства пористой быстрорежущей стали заданы пределами текучести на гидростатическое сжатие p_s и на сдвиг τ_s в зависимости от относительной плотности. Эти величины определены, исходя из предела текучести компактной быстрорежущей стали P6M5 при температуре экструзии $\sigma_{0,2}=70$ МПа. Исследовано влияние вытяжки ($\lambda=2, 4, 9$) и угла конусности матрицы ($2\alpha=60, 90, 120^\circ$) на характер распределения относительной плотности при уплотнении порошкового материала и снижение разнотолщинности оболочки по длине экструдированного прутка. Выбор указанных параметров произведен, исходя из имевшейся в наличии оснастки на предприятии

ОАО «Полема», где предполагалось осуществлять промышленный эксперимент. Вытяжку определяли как отношение площадей поперечного сечения заготовки до и

после экструзии. Диаметр капсулы был принят равным 150 мм, высота капсулы составляла 300 мм, толщина стенки 3 мм.

Выявлены четыре основные стадии экструзии: на первой стадии начинается уплотнение заготовки в областях, прилегающих к пуансону и матрице, распространяющееся на весь объем заготовки; на второй – происходит нарастание плотности по всему объему заготовки (рис. 5); третья стадия сопровождается началом выхода пористой заготовки через очко матрицы и ее доуплотнение; последняя (четвертая) стадия соответствует истечению компактного материала (рис. 6). Осевая область заготовки уплотняется в последнюю очередь и служит критерием выбора параметров экструзии.

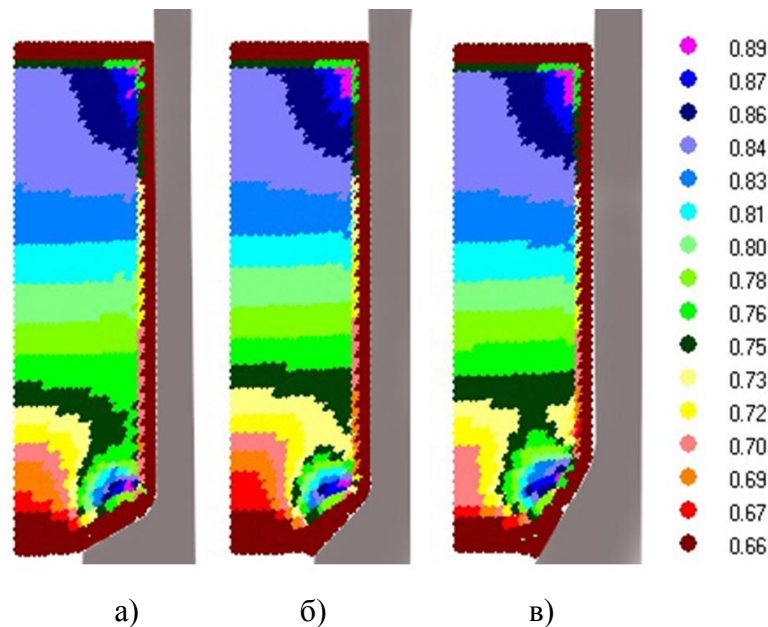


Рис. 5. Распределение плотностей заготовок до начала истечения через выходное отверстие матрицы при: а) $2\alpha=120^\circ$, б) $2\alpha=90^\circ$, в) $2\alpha=60^\circ$

При значении вытяжки $\lambda=4$ обеспечивается уплотнение порошковой стали 10P6M5-МП до практически беспористого состояния, при этом разнотолщинность оболочки не наблюдалась для всех рассмотренных углов конусности матрицы 2α . Однако минимальная протяженность зоны пониженной плотности наблюдалась при моделировании процесса экструзии в матрицу с углом конусности $2\alpha=120^\circ$ (рис. 6).

Экструзия с вытяжкой $\lambda=9$ приводит к достижению компактной плотности по всему объему заготовки до ее истечения через очко матрицы, однако вызывает появление разнотолщинности оболочки экструдированного прутка, так как в этом

случае существенно увеличивается неравномерность деформации разнородных компонентов (материала оболочки и порошковой быстрорежущей стали). Разнотолщинность оболочки может приводить к дополнительным трудозатратам и потере металла при последующем ее удалении. Влияние значения угла конусности матрицы на уплотняемость в этих условиях не обнаружено.

Минимальное значение вытяжки $\lambda=2$ не обеспечивает достаточного уплотнения заготовки по всему объему независимо от угла конусности матрицы.

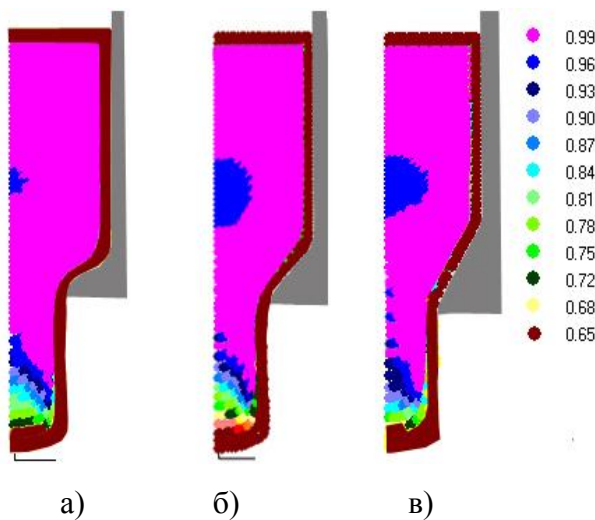


Рис. 6. Заключительная стадия уплотнения заготовки:
а) $2\alpha=120^\circ$, б) $2\alpha=90^\circ$, в) $2\alpha=60^\circ$

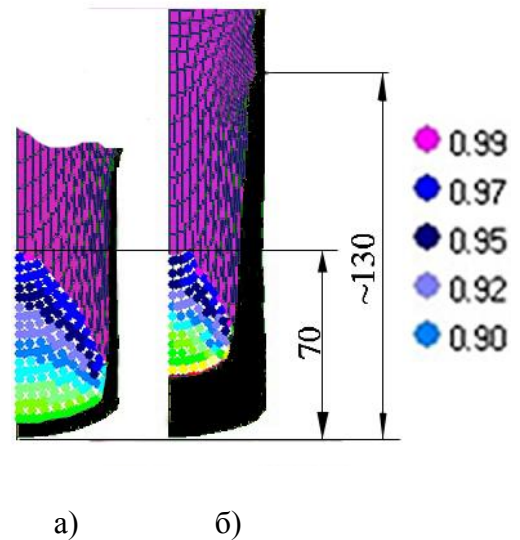


Рис. 7. Влияние толщины нижней крышки капсулы (h_k) на процесс экструзии при: а) $h_k=5$ мм; б) $h_k=20$ мм

В ходе моделирования влияния толщины нижней крышки капсулы на процесс экструзии установлено, что протяженность зоны пониженной плотности является практически одинаковой при значениях толщины нижней крышки от $h_k=5$ до $h_k=20$ мм (рис. 7). Увеличение толщины нижней крышки увеличивает разнотолщинность оболочки на ее стыке с боковой стенкой капсулы, что создает дополнительные потери порошковой быстрорежущей стали при последующем удалении оболочки (рис. 7б).

Таким образом, для практической реализации процесса экструзии может быть принято $\lambda \geq 4$, предпочтительными углами конусности являются $2\alpha=90^\circ$ и $2\alpha=120^\circ$. Для этих параметров расчетное давление экструзии под пуансоном составило $p=165$ МПа (расчетное значение усилия пресса для рассмотренной заготовки: $P=2900$ кН).

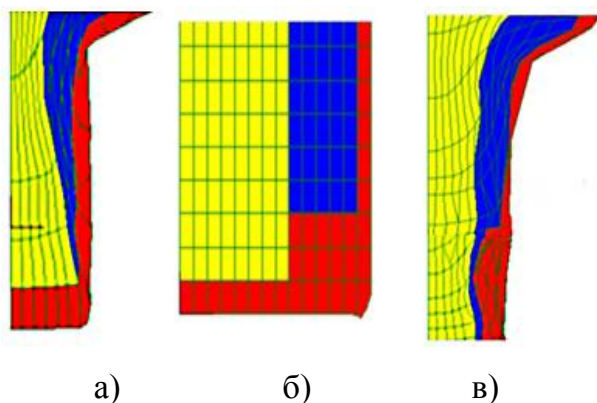


Рис. 8. Моделирование экструзии биметаллической заготовки:

- а) в капсуле с плоской крышкой при ходе пресса $\Delta h=115\text{мм}$; б) капсула новой конструкции в исходном положении и; в) при ходе пресса $\Delta h=150\text{мм}$

Для выбранных параметров экструзии проведено моделирование процесса получения биметаллической заготовки. В осевой части капсулы располагался сердечник из компактного материала (сталь 50ХФА). В пространство между сердечником и боковой стенкой капсулы был помещен порошковый материал (сталь 10Р6М5). На характер экструзии такой заготовки существенное влияние оказывает деформация сердечника из компактного материала, который сразу начинает истечение в матрицу, в то время

как пористый компонент из быстрорежущей стали проходит стадию уплотнения. Это вызывает существенную неравномерность деформации сердечника и дополнительный расход быстрорежущей стали при удалении донной части заготовки (рис. 8а). Для экономии более дорогостоящего порошкового компонента изменена конструкция нижней крышки капсулы (рис. 8б) (патент РФ №87374). Особенностью процесса экструзии заготовки в такой капсуле является то, что истечение уплотненного порошкового компонента начинается после заполнения очага деформации материалом кольцевого вкладыша (рис 8в). Таким образом, при удалении донной части расходуются только материал доннышка и небольшое количество сердечника.

В четвертой главе приведены результаты практической реализации процесса экструзии в условиях предприятия ОАО «Полема». Для осуществления процесса экструзии усовершенствована конструкция капсул: добавлен специальный изолирующий слой, препятствующий непосредственному контакту титанового геттера (применяется для поглощения газов из капсулы) и порошка быстрорежущей стали (патент РФ №81111). Такое усовершенствование позволило избежать образования эвтектического соединения титана с железом, имеющего температуру плавления 1085°C .

В работе использовали промышленные порошки газового распыления стали 10Р6М5 размером $(-315+50)$ мкм. Цилиндрические капсулы диаметром 145 мм

(толщиной стенки 3 мм), изготовленные из стали 20, заполняли порошковым материалом методом свободной засыпки с виброуплотнением (рис. 9). В верхней части капсулы укладывали геттер (титановая губка ТГ-100) и заваривали крышку капсулы. Нагрев капсул осуществляли в газовой печи до температуры $1100+50^{\circ}\text{C}$ и выдерживали их при этой температуре в течение 1 часа.

Усилие прессы в ходе экструзии составило $P=2500\dots 2900$ кН (давление $p=150\dots 175$ МПа). Эти значения удовлетворительно согласуются с расчетными данными, полученными в главе 3. Относительная погрешность расчетных данных не превышала 10%. Внешний вид прутка после экструзии приведен на рис. 10.



Рис. 9. Капсулы для экструзии



Рис.10. Пруток после экструзии

Результаты взвешивания прутков после удаления остатков капсулы, заходной части с пониженной плотностью и пресс-остатка показали, что в ходе механической обработки прутков потеряно около 9% (масс.) быстрорежущей стали, что является значительным снижением потерь металла по сравнению с ранее проводимыми работами ЦНИИ Материалов (потери составляли 30% и более).

Для оценки прочности схватывания быстрорежущей стали с материалом сердечника биметаллической заготовки проводили испытания на растяжение биметаллических образцов, вырезанных в поперечном сечении прутка (рис.11). Термообработку образцов проводили по стандартному режиму, рекомендованному для быстрорежущей стали. При испытании образцы разрушались в зоне материала сердечника, а не по границе раздела компонентов. Это свидетельствует о хорошем сцеплении компонентов в заготовке, несмотря на повышенную пористость вблизи границы их раздела (рис. 11б).

Относительная плотность порошковой быстрорежущей стали 10P6M5-МП, полученной в промышленных условиях по расчетным режимам экструзии, составила $\Theta=0,98$. Предел прочности на изгиб образцов из этой стали имел значение $\sigma_{\text{изг}}=2500\div 3300$ МПа, которое соответствует пределу прочности стали P6M5 слиткового способа производства. Сравнительно невысокое значение предела прочности объясняется наличием дефектов в микроструктуре, в частности остаточной пористости (около 2%).

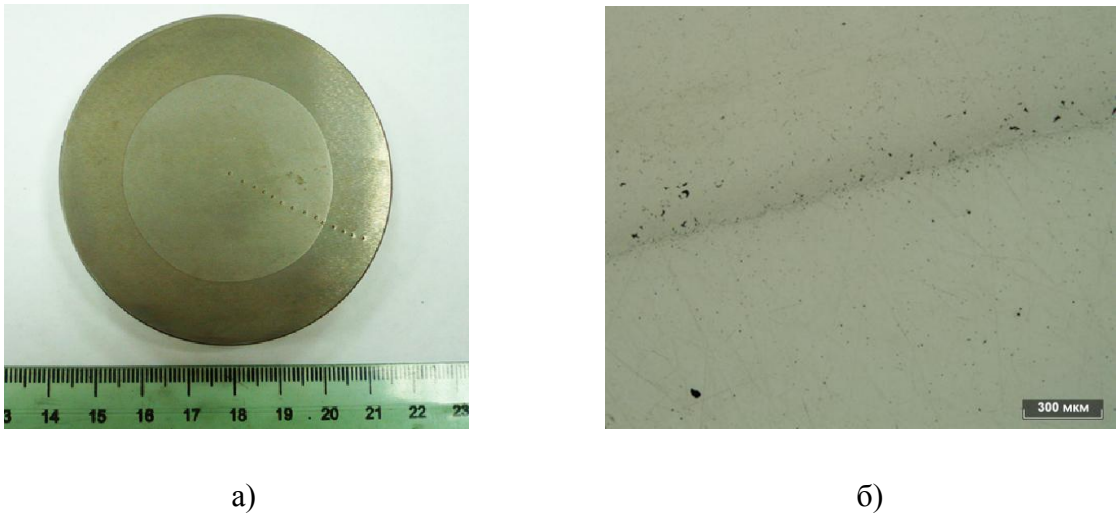


Рис. 11. Биметаллический пруток: а) поперечный срез, б) структура переходной зоны

В работе выполнена расчетная оценка влияния дефектов микроструктуры и размера зерна на прочность быстрорежущей стали. Для количественного описания этого влияния использовано уравнение, полученное Олмондом:

$$\sigma_f = \left(\frac{K_y^2 d}{4t^2} + \frac{4E\gamma}{t} \right)^{1/2} - \frac{K_y d^{1/2}}{2t},$$

где d - размер зерна; K_y - константа пропорциональности для данного металла; t - размер карбида; E - модуль нормальной упругости; γ - поверхностная энергия раскрытия трещины. В табл. 3 представлены результаты расчетов.

Поскольку в рассматриваемом соотношении прочность стали оценивается при растяжении образцов, а прочность быстрорежущих сталей определяют при изгибе, в уравнение введен множитель, равный 2,9 для металлов с ОЦК-решеткой. При расчете были приняты следующие значения констант: $K_y = 0,78$ МПа·м^{1/2}; $\gamma = 20,7$ Н/м; $E = 200$ ГПа.

Таким образом, расчетная прочность порошковой быстрорежущей стали при отсутствии дефектов может превышать 7000 МПа. Однако прочность экспериментально полученных прутков из стали 10P6M5-МП примерно в 2-3 раза ниже расчетной, из-за наличия остаточной пористости.

Таблица 3

Расчетные значения предела прочности при изгибе быстрорежущей стали P6M5

Размер зерна аустенита d, мкм	Размер карбида t, мкм	Прочность $\sigma_{f, \text{изг}}$, МПа
10	10	3320
5	10	3450
5	5	4700
5	2	7000
5	1,5	7890

Проведение дополнительной горячей пластической деформации экструдированных заготовок в данном случае одновременно решает две задачи: получение беспористого материала с целью повышения механических свойств и уменьшение диаметра заготовок с целью их использования для мелкого тонколезвийного режущего инструмента, в котором достигается наибольший эффект от применения порошковой быстрорежущей стали.

В настоящей работе была осуществлена горячая прокатка экструдированных заготовок с диаметра 70 мм до диаметра 24 мм с суммарной вытяжкой $\lambda_n=8,5$ и ротационная ковка с диаметра 24 мм до диаметров 22 – 8 мм (с шагом 2 мм).

Термическую обработку проводили по следующему режиму: закалка в масло от 1200°C и трехкратный отпуск в течение 1 часа при температуре 560°C. Стабильные и высокие механические свойства были получены на образцах, вырезанных из прутков диаметром 18 мм: результаты испытаний на изгиб показали значения предела прочности $\sigma_{\text{изг}}=4500\div 5000$ МПа. Это значение в полтора раза выше предела прочности, достигаемого быстрорежущей сталью непорошкового способа производства. Ударная вязкость стали 10P6M5–МП: $KC=3,5\ldots 5,2$ кДж/м².

Проведено исследование микроструктуры порошковой стали в сравнении со сталью P6M5 традиционной (слитковой) технологии производства (пруток диаметром 16 мм). На рис. 12 приведено распределение карбидов в структуре порошковой и непорошковой быстрорежущей стали. Карбиды в порошковой стали отличаются

меньшим размером ($d_{cp}=1,3$ мкм) и более равномерным распределением. Это способствует измельчению зерна аустенита получению более однородной структуры после закалки (рис. 13) и, как следствие, позволяет получить более высокие физико-механические свойства порошковой быстрорежущей стали.

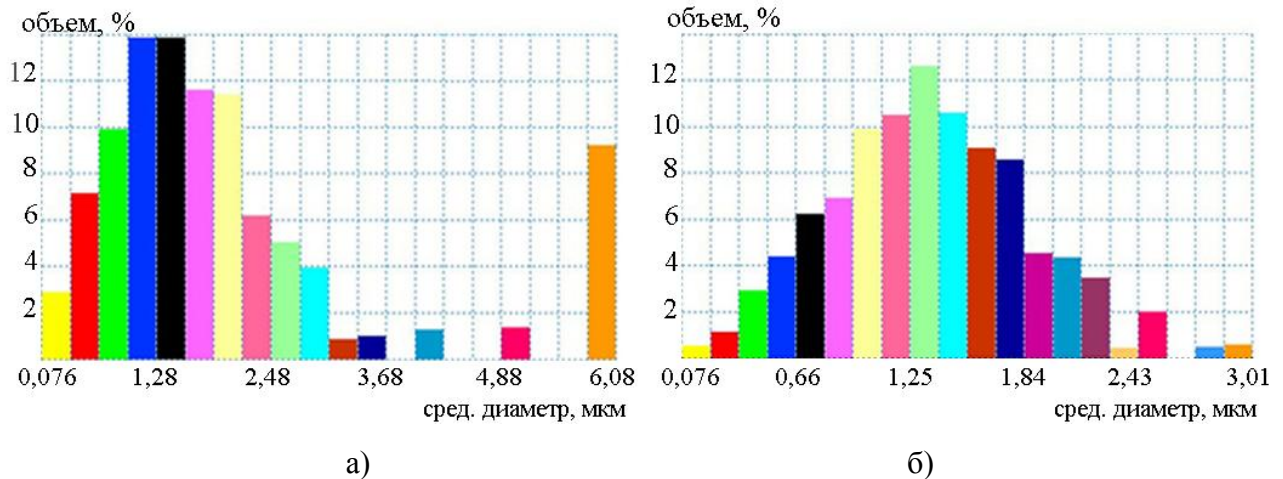


Рис. 12. Распределение размера карбидов после термообработки в структуре непорошковой (а) и порошковой (б) быстрорежущих сталей

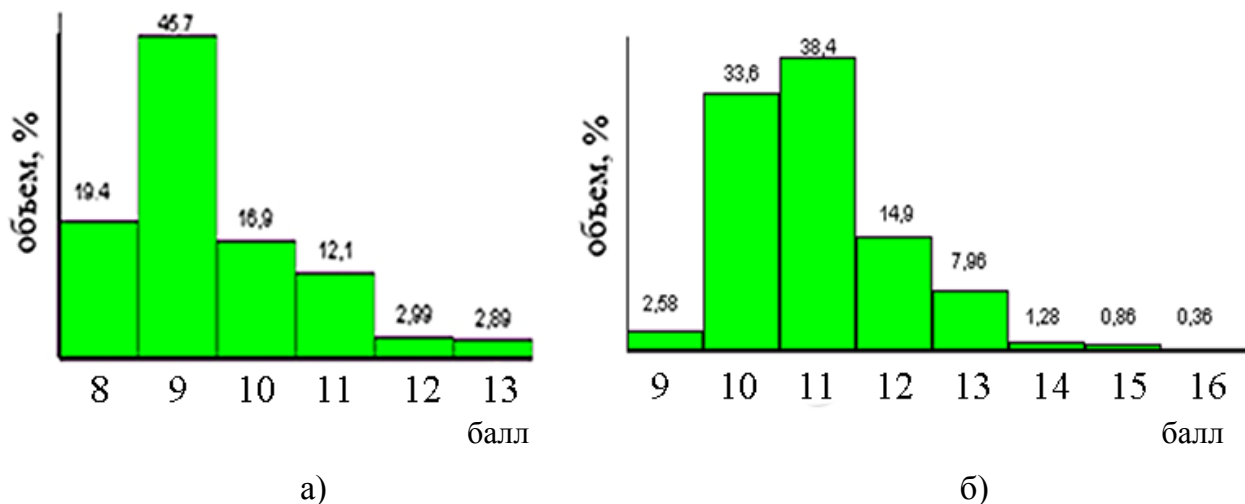


Рис. 13. Распределение размера аустенита после закалки непорошковой (а) и порошковой (б) быстрорежущих сталей

Таким образом, комплекс проведенных в настоящей работе исследований позволил усовершенствовать технологию производства полуфабрикатов из порошковой быстрорежущей стали, которая должна включать следующие основные этапы: центробежное распыление порошков; отжиг и очистку порошка в вакууме (температура $T=1100\pm 50^{\circ}\text{C}$, выдержка $\tau=1$ час, давление в печи $p\leq 10^2$ Па); снаряжение порошком капсул усовершенствованной конструкции; нагрев капсул в

вертикальном положении до температуры $T=1100+50^{\circ}\text{C}$ и их горячую экструзию с вытяжкой $\lambda \geq 4$; механическое удаление оболочки; прокатку или ротационную ковку прутков с вытяжкой $\lambda_{\text{пд}} \geq 15$ в температурном диапазоне $T_{\text{пд}}=1150 \dots 870^{\circ}\text{C}$.

Кроме этого, осуществление процесса экструзии с относительно небольшими вытяжками в перспективе дает возможность применять для этих целей более простые в техническом оснащении вертикальные экструзионные прессы.

В условиях ООО «Томский инструментальный завод» из полученных заготовок порошковой быстрорежущей стали изготовлена партия режущего инструмента (сверла и фрезы). Испытания режущего инструмента, проведенные на ряде машиностроительных предприятий, показали, что стойкость сверл и фрез из стали 10P6M5-МП превышает стойкость режущего инструмента из быстрорежущей стали традиционного способа производства в среднем в 1,5 – 2 раза. При некоторых режимах резания стойкость инструмента из полученного материала может достигать 5-ти кратного превышения стойкости инструмента того же сортамента, изготовленного из стали P6M5 традиционного способа производства.

В приложениях приведены акты испытаний режущего инструмента, полученных от машиностроительных заводов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Усовершенствована технология получения заготовок из быстрорежущей стали, включающая основные этапы производства, в основу которой положена горячая экструзия порошкового материала в металлической оболочке, позволяющая за счет снижения неравномерности деформации компонентов исключить разнотолщинность оболочки и повысить выход годного металла.
2. На основе математического моделирования и расчетно-теоретического анализа процесса охлаждения и кристаллизации частиц, выполненного с использованием программы «Полигон», установлены конструктивно-технологические параметры центробежного распыления порошка быстрорежущей стали, обеспечивающие получение заданного гранулометрического состава.
3. Спроектирована, запатентована и изготовлена установка центробежного распыления порошков. Полученные на экспериментальной установке порошки стали 10P6M5 имеют более гладкую форму частиц и узкий фракционный состав,

что позволяет повысить уплотняемость порошков в сравнении с порошками газового распыления той же марки.

4. Численный эксперимент, выполненный с использованием программы конечно-элементного моделирования «*MultiDef*», позволил определить характер уплотнения порошковых быстрорежущих сталей в процессе горячей экструзии, основные технологические параметры процесса, а также спроектировать новые типы капсул, применяемых для получения порошковой и биметаллической заготовок.
5. Осуществлена реализация процесса экструзии по установленным в ходе моделирования технологическим параметрам в производственных условиях. Получена опытная партия заготовок и проведены сравнительные исследования структуры и физико-механических свойств полученной порошковой стали 10P6M5-МП и непорошковой стали P6M5. Разработаны практические рекомендации по промышленной реализации процесса получения заготовок из порошковой быстрорежущей стали.
6. Установлено, что повышение прочностных свойств порошковой быстрорежущей стали при использовании предлагаемых технологических режимов изготовления заготовок достигается благодаря формированию в структуре равномерно распределенных карбидов относительно небольшого размера и однородной мелкозернистой структуры аустенитного зерна после закалки. Дополнительная горячая деформация заготовок с вытяжкой $\lambda \geq 15$ позволяет повысить предел прочности порошковой стали 10P6M5-МП в 1,5 – 2 раза.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Получение и исследование свойств распыленного порошка быстрорежущей стали 10P6M5 // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы научно-практической конференции СПб. – 2010. – с.60-64.
2. Цеменко В.Н., Абрамов А.А., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Структура и свойства биметаллического прутка сталь 10P6M5-МП – сталь 50XФА, полученного способом горячей экструзии // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка. Материалы доклада 9-й международной научно-технической конференции. Минск, Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ. – 2010. – с.23-24.

3. Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Исследование свойств порошка быстрорежущей стали 10P6M5 // Нанотехнологии функциональных материалов (НМФ'10): Труды международной научно-технической конференции. – 2010. – с.366-368
4. Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Дефекты структуры и прочность порошковых быстрорежущих сталей // Нанотехнологии функциональных материалов (НМФ'10): Труды международной научно-технической конференции. – 2010. – с.369-374
5. Мазуров С.А., Гиршов В.Л., Цеменко В.Л. Получение и исследование свойств биметаллического прутка сталь 10P6M5-МП – сталь 50ХФА // Материалы международной научно-практической конференции XXXIX Неделя науки СПбГПУ. – СПб. – 2011. – с.178-181.
6. **Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Исследование влияния дефектов структуры на прочность порошковых быстрорежущих сталей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – №3. – с.175-180**
7. Цеменко В.Н., Мазуров С.А., Гиршов В.Л. Исследование структуры порошковой быстрорежущей стали // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2011): Труды международной научно-технической конф. СПб. – 2011. – с.103-106
8. **Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Сравнительный анализ структуры порошковой быстрорежущей стали // Metalloobrabotka. – 2011. – №5. – с.37-39.**
9. **Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Моделирование процесса горячей экструзии порошковой быстрорежущей стали // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – №4. – с.235-248**
10. **Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Моделирование и исследование процесса получения заготовок для инструмента из порошковой быстрорежущей стали // Заготовительные производства в машиностроении. Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства. – 2012. – №10. – с.18-21.**
11. В.Н. Цеменко, В.Л. Гиршов, С.А. Мазуров Исследование процесса получения порошковой быстрорежущей стали с дисперсной структурой // Нанотехнологии функциональных материалов: Труды международной научно-технической конференции. - СПб. – 2012. – с. 325-329.
12. **Абрамов А.А., Гиршов В.Л., Мазуров С.А., Самойленко Л.С. Капсула для изготовления изделий из металлических порошков // Патент России № 81111. 2008.**
13. **Гиршов В.Л., Багиров М.А., Мазуров С.А. Капсула для горячей экструзии биметаллических прутков // Патент России № 87374. 2009.**
14. **Гиршов В.Л., Мазуров С.А., Халтурина Л.С. Установка для получения металлических гранул // Патент России № 85382. 2009.**