

**УДК 621.762.06**

## **РАЗВИТИЕ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В РОССИИ**

Даниил Сергеевич Шумков

*Студент 4 курса,  
кафедра «Технологии и оборудование прокатки»  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: О.В. Соколова,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование прокатки»*

*Приводится обзор современных методов порошковой металлургии. Описываются методы формовки порошков с заданными свойствами. Даны основные характеристики различных процессов спекания. Приводятся примеры использования заготовок произведённых по данным методам.*

*Modern methods of powder metallurgy are presented. Forming methods of powders with specified properties are described. The characteristics of various sintering processes are presented. The examples of produced billets application are mentioned.*

*В последнее десятилетие, развитие технологий производства металлических изделий и полуфабрикатов в тяжелой промышленности диктуют необходимость изготовления деталей и частей сборочных единиц, имеющих однородную мелкозернистую структуру. Добиться подобных параметров, как уже показали многочисленные исследования и практики двух последних десятилетий, позволяет порошковая технология. Методы производства металлических полуфабрикатов и изделий, основанные на данном принципе, обладают высокими уровнями точности линейных размеров, богатым ассортиментом форм и размеров изделий, но, главное, высоким уровнем однородности изделия по сечению. Это и делает методы порошковой металлургии объектом внимания многочисленных исследований научно-исследовательских институтов у нас, в Российской Федерации, и за рубежом. Рассмотрим традиционные и инновационные методы порошковой металлургии.*

В порошковой металлургии в настоящее время применяются множество технологий формовки. Логичнее всего будет начать обзор с традиционных технологий. Для прессования нанопорошков наиболее широкое распространение получила *технология одноосного прессования*, такие его методы как: статическое (прессование в пресс-формах или штамповка), динамическое (магнитно-импульсное и взрывное) и вибрационное (ультразвуковое) прессование [1,4,6].

Для получения высокоплотных формовок применяется прессование, при котором условия сжатия материала близки к всестороннему. Эта технология получила название *изостатического прессования*. Существует несколько его вариантов: гидростатическое, газостатическое, квазигидростатическое. При изостатическом прессовании порошка его помещают в эластичную или деформируемую оболочку [1] (рис.1).

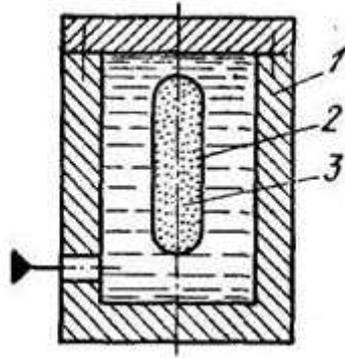


Рис.1. Схема изостатического прессования: 1- камера, 2- прессовка, 3- металлический порошок

Получаемые формовки отличаются практически однородной плотностью (правда иногда во внутренних объемах формовки она несколько меньше) и не имеют выраженной анизотропии свойств. Недостатком является достаточная сложность и дороговизна оборудования и сложность выдерживания точности размеров формовки [6].

*Гидростатическое прессование* проводят при использовании резиновых или других эластичных оболочек толщиной 0,1-2 мм. Оболочку с порошком помещают в рабочую камеру гидростата (рис.2) и нагнетают туда жидкость (масло, вода, глицерин и др.) под высоким давлением (от 100 до 1200 МПа). Получаемые формовки могут иметь сложную форму. При гидростатическом прессовании можно получать изделия с очень большим отношением высоты к диаметру. Точно так же гидростатическим прессованием легче получать прессовки больших размеров. При гидростатическом прессовании, в связи с всесторонностью давления и отсутствием потерь на трение о форму, при одинаковом давлении в сравнении с обычным прессованием получают более плотные и прочные прессовки, а при одинаковой плотности требуется меньшее давление, чем при обычном прессовании.

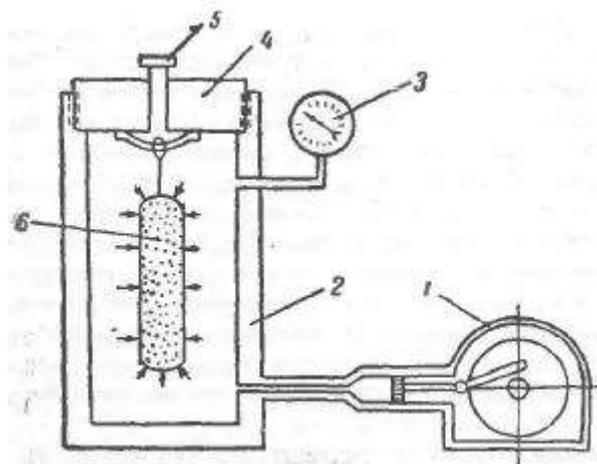


Рис. 2. Схема установки гидростатического прессования: 1- насос высокого давления, камера прессования, 2- камера, 3- манометр, 4- затвор, 5- воздушник, 6- прессовка

*Газостатическое прессование* проводят при использовании металлических оболочек (капсул) из алюминия или пластичных сталей. Форма оболочек – простая, максимально приближенная к готовым изделиям. Часто газостатическому прессованию подвергают уже полученную ранее другими методами заготовку. Металлическую капсулу помещают в газостат,

в рабочей камере которого создают давление до 200...300 МПа [6]. Газостатическая обработка порошковых материалов позволяет получать изделия сложной формы, сократить припуски на механическую обработку в 2-3 раза, снизить расход металла на 30-40%. Кроме того, комбинированное воздействие на заготовку высоких всесторонних давлений и температуры позволяет эффективно устранять («залечивать») микро- и макродефекты, возникающие в монолитных заготовках при получении их традиционными методами (литьем, ковкой, прокаткой).

*Квазигидростатическое прессование* является упрощенным вариантом гидростатического прессования. Порошок помещают в эластичные оболочки, прессование которых проводят при одностороннем или двустороннем приложении давления в обычном прессовом оборудовании. Материал оболочки (резиновая масса, эпоксидные смолы и т.д.) должен под давлением вести себя подобно жидкости, иметь определенную упругость и не склеиваться с порошком.

Успешно начал использоваться в последнее время и метод интенсивной пластического деформирования – *кручение под давлением*. В отдельных случаях для получения лент применяют прокатку. При деформации кручением под высоким давлением полученные образцы имеют форму дисков. При этом образец помещается между бойками и сжимается под приложенным давлением  $P$  в несколько ГПа. Нижний боёк вращается и силы поверхностного трения заставляют образец деформироваться сдвигом. Геометрическая форма образцов такова, что основной объём материала деформируется в условиях квазигидростатического сжатия под действием приложенного давления и давления со стороны внешних слоёв образца. В результате деформируемый образец, несмотря на большие степени деформации не разрушается.

*Спекание* формовок из нанопорошка ограничено невозможностью использовать высокие температуры. Повышение температуры спекания приводит к уменьшению пористости, но с другой стороны ведет и к росту зерна. Эту проблему решают рядом методов активации, позволяющих добиваться получения низкой пористости изделий при более низких температурах спекания [1,8-10]:

- применение высокоскоростного микроволнового нагрева (при увеличении скорости нагрева с 10 до 300 град/мин необходимая температура спекания нанопорошка  $TiO_2$  снижается с 1050 до 975 °С [1]);
- ступенчатое контролируемое спекание;
- плазмоактивированное спекание.
- проведение спекания в вакууме или восстановительных средах (для металлических порошков)

Наиболее простой способ достижения больших значений плотности – *спекание при одноосном приложении давления*. Так по данным [1] при проведении спекания нанопорошка железа под давлением прессования до 400 МПа температура спекания, при которой отсутствует пористость, снижается с 700 до 350 °С, а размер зерна изделий уменьшается с 1,2 мкм до 80 нм. В случае металлических нанопорошков для активации процесс проводят в вакууме или восстановительной атмосфере (рис.3).

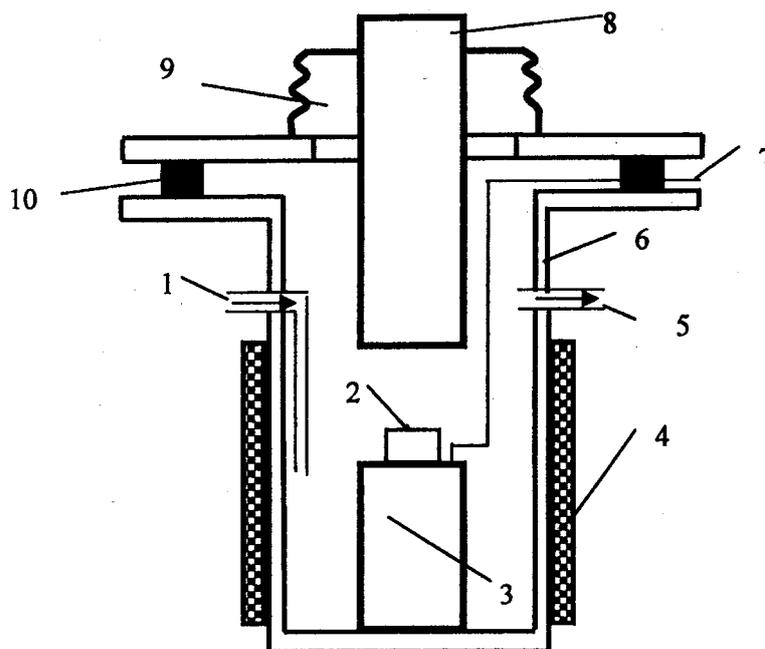


Рис. 3. Схема установки, разработанной в ИМЕТ РАН для спекания нанопорошков под давлением: 1- вход инертного или реакционного газа, 2- формовка, 3- наковальня, 4- нагревательный элемент, 5- вывод газа, 6- рабочая камера, 7- термопара, 8- пуансон, 9- сильфон, 10- герметизирующая прокладка [1].

Более прогрессивным методом совмещения процессов формовки и спекания является *горячее изостатическое прессование (ГИП) с использованием газостатов*, являющееся универсальным и широко применяемым в практике порошковой металлургии [4,6]. В современных установках могут быть достигнуты давления до 300 МПа и температуры до 2000 °С. Металлические сварные капсулы для порошков изготавливают в этом случае из углеродистой или коррозионностойкой стали.

Более дешевым вариантом, заменяющим ГИП, является так называемый *метод быстрого ненаправленного компактирования* [4]. В этом процессе используется нагреваемая толстостенная цилиндрическая пресс-форма, которая после заполнения порошком подвергается одноосному сжатию под высоким давлением (до 900 МПа). Метод позволяет спрессовать металлический порошок почти до 100% плотности всего за несколько минут.

*Метод высокотемпературной газовой экструзии* заключается в получении формовки гидростатическим методом при комнатной температуре, ее термической обработке в среде водорода при относительно низкой температуре и последующем экструдировании при повышенной температуре [89]. Этот метод позволяет проводить компактирование порошков при кратковременном температурном воздействии и достаточно больших температурах. Например, компакты, полученные этим методом из никелевого нанопорошка, отличались высокими прочностными показателями при одновременных очень хороших показателях пластичности [14].

*Метод эжекционного литья* основан на добавлении в порошок специальной связки (например, термопластичные полимеры типа полипропилена, полиэтилена или полистерола), которая обеспечивает малую вязкость порошковой смеси [1,7]. Недостатки метода связаны со сложностью процесса удаления связующих при выгорании (изменение формы детали, процессы взаимодействия продуктов разложения термопластических веществ с материалом порошка, обеспечение свободного удаления смеси при выжигании). Поэтому этот метод ограниченно

используется для получения небольших специальных деталей сложной формы с толщиной стенок менее 10 мм [7].

Аморфные металлические сплавы являются новым перспективным классом материалов [11,12]. Аморфное состояние сплава характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов упаковки. Такое состояние достигается сверхбыстрым охлаждением материала из газообразного, жидкого или ионизированного состояния. Существуют следующие *методы получения аморфных сплавов* [12]:

- высокоскоростное ионно-плазменное и термическое напыление материала на охлаждаемую жидким азотом подложку (позволяет получать слои толщиной до 5 мм);
- химическое или электролитическое осаждение ионов металлов на подложку;
- оплавление тонких поверхностных слоев деталей лазерным лучом;
- лазерная обработка смеси порошков при быстром отводе тепла от расплава;
- закалка из жидкого состояния.

Последний метод в настоящее время наиболее отработан и исследован и является основным методом получения аморфных сплавов. Аморфный сплав имеет другие, не похожие на металлические, свойства. Сохраняется блеск, электропроводность и все другие характерные особенности. Но повышается прочность, стойкость к коррозии, меняются электромагнитные характеристики. Также изменяется даже одна из наиболее устойчивых постоянных – модуль упругости. Однако самое важное достоинство этого нового материала заключается в другом. В нем отличным образом соединяются и уживаются все составные компоненты. Если применить сверхбыстрое охлаждение, сплав затвердеет, и все противоречащие ему компоненты просто не успеют проявить себя. Данные сплавы имеют широкую область применения: сердечники генераторов и электродвигателей, магнитопроводов и трансформаторов, плетеные сетки удачно заменяющие арматуру в железобетонных плитах, канаты, прочные волокнистые композиты [7,11,12]. Производство лент, фольг и проволоки (толщиной до 100 мкм и шириной до 200 мм) проводится по схеме подачи струи жидкого металла на вращающийся водоохлаждаемый барабан (как правило медный) с гладкой поверхностью (рис. 4). Иногда используют также схему извлечения жидкого металла из ванны расплава быстро вращающимся водоохлаждаемым диском, погруженным вертикально торцом в расплав. Еще один способ заключается в расплавлении сплава токами высокой частоты, вытягивании и быстром охлаждении аморфной нити толщиной до 200 мкм жидкой средой [11]. В случае нанесения на нить перед охлаждением стеклообразного покрытия способ используют для получения стеклометаллических аморфных композиционных материалов.

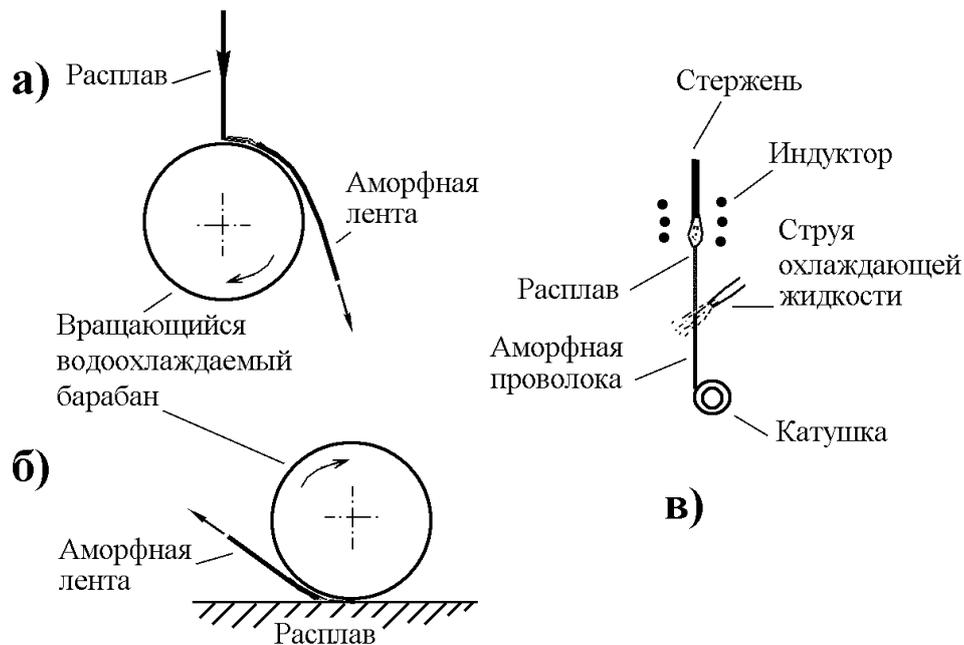


Рис. 4. Принципиальные схемы получения аморфных лент и проволок методом быстрого охлаждения: а) закалка на вращающемся барабане, б) экстракция расплава вращающимся барабаном, в) охлаждение тонкой струи расплава жидкостью.

Возможность получения аморфного состояния определяется химическим составом и скоростью охлаждения. Последняя обычно составляет  $10^5$ - $10^{10}$  °C/с [12]. С точки зрения выбора химического состава сплава существуют два подхода: введение специальных легирующих элементов-аморфизаторов или выбор сплавов, имеющих определенную базовую эвтектику.

В ряде случаев для получения аморфного состояния проводят предварительную обработку (например высокоскоростную закалку) заготовок, а такие заготовки часто называют «прекурсорами».

Для ряда объемно-аморфизирующихся сплавов, например для сплавов на основе железа, возможно получение нанокристаллической или аморфно-нанокристаллической структуры непосредственно при закалке расплава со скоростью охлаждения немного ниже критической скорости образования аморфного состояния [1]. Однако для большинства сплавов при таком подходе получается неоднородная, нестабильная структура. Поэтому для получения наноструктуры используется контролируемая кристаллизация сплавов из аморфного состояния при термообработке [13]. В качестве перспективы рассматривается получение нанокристаллической структуры путем инициации процессов кристаллизации в процессе деформирования аморфного материала.

Методы с использованием интенсивной пластической деформации основаны на проведении пластической деформации с большими степенями деформации в условиях высоких приложенных давлений при относительно низких температурах. В таких условиях деформирования происходит сильное измельчение микроструктуры в металлах и сплавах до наноразмерного диапазона [1,2,3]. Эта группа методов позволяет получать объемные безпористые металлические наноматериалы. Следует однако отметить, что диапазон размеров зерен материалов, получаемых рассматриваемыми методами, как правило, составляет все же более 100 нм. Структура, получаемая при интенсивной пластической деформации, отличается сильной неравновесностью из-за малой плотности свободных дислокаций и преимущественно

большееугловом характере границ зерен. Поэтому для обработанных изделий применяют дополнительную термообработку или дополнительное пластическое деформирование при повышенных температурах и большой степени деформации [1].

В настоящее время наиболее отработаны два следующих метода (рис. 5).

*Метод кручения под высоким давлением* - основан на принципе наковален Бриджмена, в которых образец помещается между бойками и сжимается под приложенным давлением в несколько ГПа, а затем прилагается деформация с большими степенями (10 и более) [2]. Средний размер зерен может достигать 100-200 нм (рис. 4. 14а) и определяется условиями деформации – давлением, температурой, скоростью деформации и видом обрабатываемого материала [2].

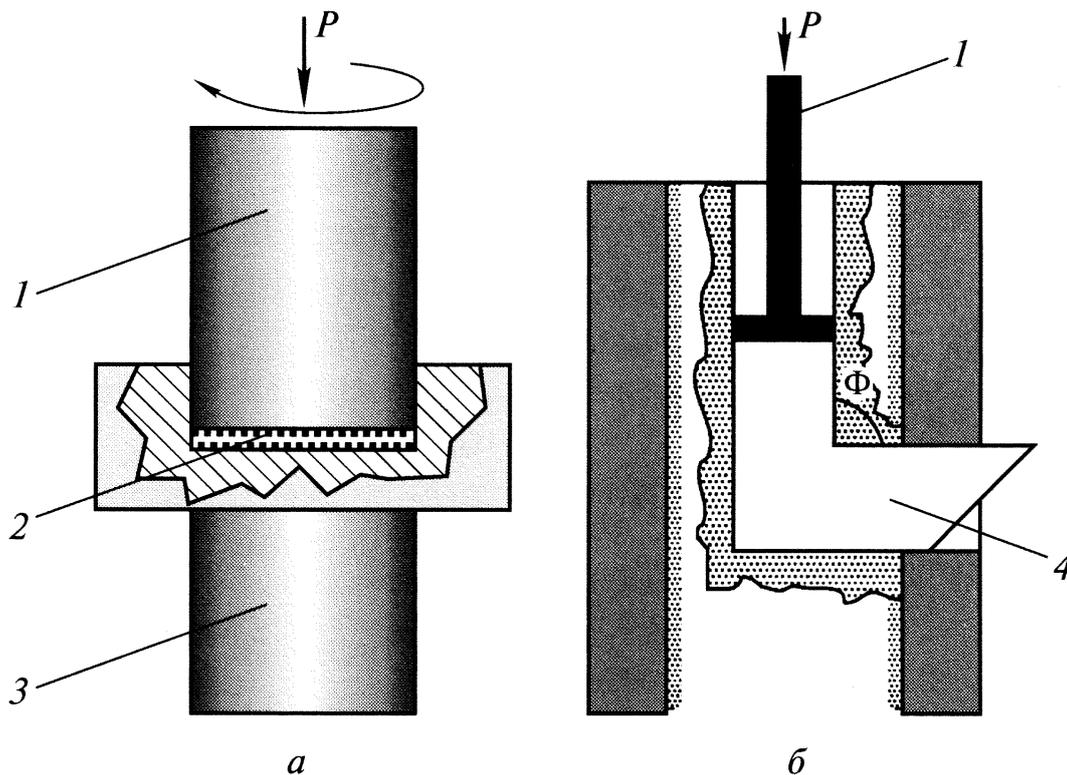


Рис. 5. Схема методов интенсивной пластической деформации: а- метод кручения под высоким давлением, б- метод равноканального углового прессования, 1- пуансон, 2- образец, 3- суппорт, 4- заготовка [2].

*Метод равноканального углового прессования* обеспечивает получение более крупных размеров деталей с диаметром до 60 мм и длиной до 200 мм [2,3]. Этот метод также основан на использовании деформации сдвигом. Метод позволяет формировать ультрамелкозернистую структуру со средним размером зерен в диапазоне от 200 до 500 нм (рис. 6) [2].

Разрабатываются также другие методы интенсивной пластической деформации, например, всесторонняя ковка и специальная прокатка.

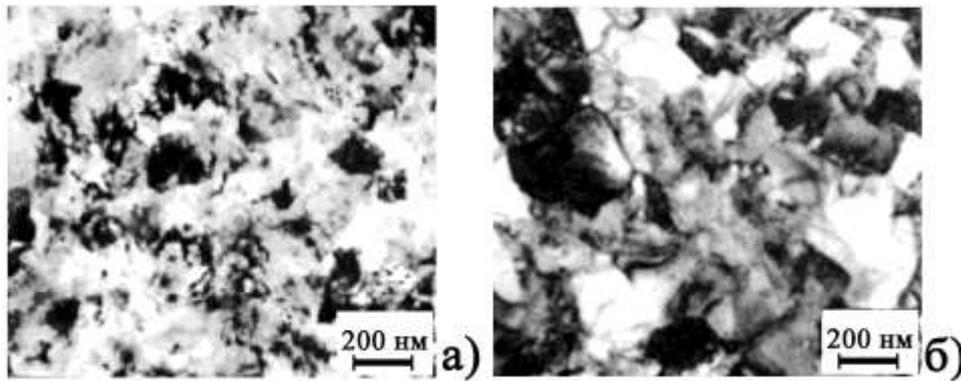


Рис. 6. Наноструктуры меди, полученной разными методами: а - методом кручения под высоким давлением, б - методом равноканального углового прессования [2].

К первой группе можно отнести технологии, основанные на химических процессах, а ко второй – на физических процессах.

Рассмотрим основные физические процессы. *Взрывное испарение.* Данный метод в настоящее время быстро развивается. Он основан на выделении очень большого количества энергии за малый промежуток времени. Среди *технологий высокоэнергетического синтеза нанопорошков* нашли применение два метода – детонационный и плазмохимический [1].

*Детонационный синтез* основан на воздействии ударной волны с давлением до нескольких десятков ГПа на смесь исходных реагентов. По этому методу, например, получают алмазный нанопорошок со средним размером частиц 4 нм из смеси графита с металлами порошок под действием взрыва органических веществ с высоким содержанием углерода и низким содержанием кислорода [5]. Получены также нанопорошки различных морфологических форм углерода и оксидов Al, Mg, Zr, Zn.

При этом материал испаряется, и затем за счет быстрого увеличения объема охлаждается с конденсацией паров в частицы малого размера.

#### **Выводы:**

В настоящей статье приведен обзор современных методов получения порошков с заданной структурой и свойствами. Даны основные характеристики процессов и целесообразность их применения для определенного класса изделий. Я считаю, что данная обзорная статья должна дать начинающим и опытным металлургам и инженерам машиностроения представление о том, какими методами располагает современная порошковая металлургия и побудить к размышлениям и дальнейшим экспериментам в этой области производства заготовок.

#### **Литература:**

1. *Алымов М.И., Зеленский В.А.* Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. - М.: МИФИ, 2005. – 52 с.
2. *Новые материалы.* Под ред. *Ю.С. Карабасова* – М.: МИСИС, 2002 – 736 с.
3. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
4. *Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства области применения / Отв. ред. И.М. Федорченко* – Киев: Наукова думка, 1985 – 624 с.
5. *Белошапко А.Г., Букаемский А.А., Кузьмин И.Г., Ставер А.М.* // Физика горения и взрыва, 1993. Т.29. №6. С.111-116.
6. *Кипарисов С.С., Падалко О.В.* Оборудование предприятий порошковой металлургии М.: Металлургия, 1988. 448 с.

7. Новое в технологии получения материалов / Под ред. Ю.А. Осипьяна и А. Хауффа. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
8. Bykov Y., Gusev S., Ereemeev A. et al. Sintering of nanophase oxide ceramics by using millimetr-wave radiation // Nanostr. Mat., 1995. V.6. №5-8. P.855-858.
9. Chen I.-W., Wang X.H. Sintering dense nanocrystalline ceramics without final-stage grain growth // Nature, 1996. V.404. №9. P.168-171.
10. Mishra R.S., Schneider J.A., Shackelford J.F., Mukherjee A.K. Plasma activated sintering of nanocrystalline  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>// Nanostr. Mat., 1995. V.5. №5. P.525-544.
11. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы. – М.: Наука, 1999.
12. Конструкционные материалы/ Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
13. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе // Металловедением и термическая обработка, 2005. №7. С.
14. Alymov M.I., Leontieva O.N. Synthesis of nanoscale Ni and Fe powders and properties of their compacts // Nanostr. Mat., 1995. V.6. №1-4. P.393-395.