

*Работа поддержана РФФИ
в исследовательских проектах № 18-08-01475, 18-41-220004,
а также грантом № 13-01-20/28
«Ведущая научная школа
Югорского государственного университета».*

М. И. Алымов, П. Ю. Гуляев, С. В. Семичев

КОНСОЛИДАЦИЯ ПОРОШКОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ: ОБЗОР ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

В статье представлен краткий обзор литературных данных о методах производства, свойствах и перспективных областях применения консолидированных материалов, полученных из нанопорошков. Рассмотрено влияние размера наночастиц на производительность различных технологий и плотность получаемых продуктов.

Ключевые слова: наноматериалы, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, порошковая металлургия, спекание порошков.

M. I. Alymov, P. Yu. Gulyaev, S. V. Semichev

CONSOLIDATION OF POWDER NANOMATERIALS: REVIEW OF DEVELOPMENT AND APPLICATION TRENDS

The article provides a brief review of literature data on production methods, properties and promising areas of application of consolidated materials obtained from nanopowders. The influence of the size of nanoparticles on the performance of various technologies and the density of the resulting products is considered.

Key words: nanomaterials, self-propagating high-temperature synthesis, powder metallurgy, powder sintering.

Введение

Прогресс во многих технических областях непосредственно связан с улучшением качества материалов. Проблемы разработки новых материалов с заранее заданными и программируемыми свойствами успешно решаются методами порошковой металлургии [1]. Порошковые материалы обеспечивают набор уникальных эксплуатационных свойств: тугоплавкость, контролируемая пористость, высокая прочность, микротвердость, специфические трибологические, магнитные и другие свойства [1; 4; 8,]. Во многих случаях применение порошковых материалов дает значительный экономический и экологический эффект [2; 5]. В последнее время термины «нанотехнология» и «наноматериалы» вошли в обиход из науки и техники, где с этими понятиями в первую очередь связывают получение нанопорошков и производство из них в процессе консолидации прочных изделий. В этой статье представлен краткий обзор литературы о методах производства, свойствах и перспективных областях применения сыпучих материалов, полученных из нанопорошков.

Цель данного исследования: обзор тенденций развития и определение влияния размера наночастиц на производительность различных технологий и плотность получаемых продуктов.

Обзор основных методов

На сегодняшний день разработаны различные методы синтеза нанопорошков. На рис. 1 показана взаимосвязь между производительностью метода синтеза нанопорошков и их качеством для некоторых методов. Производительность методов производства нанопорошков уменьшается с увеличением требований к дисперсии порошка: небольшой средний размер частиц, узкое распределение частиц по размерам, низкое содержание примесей. Из методов, которые были использованы в промышленности, методы синтеза оксидов имеют наивысшую производительность [3; 6], методы получения металлических порошков менее производительны [1; 8].

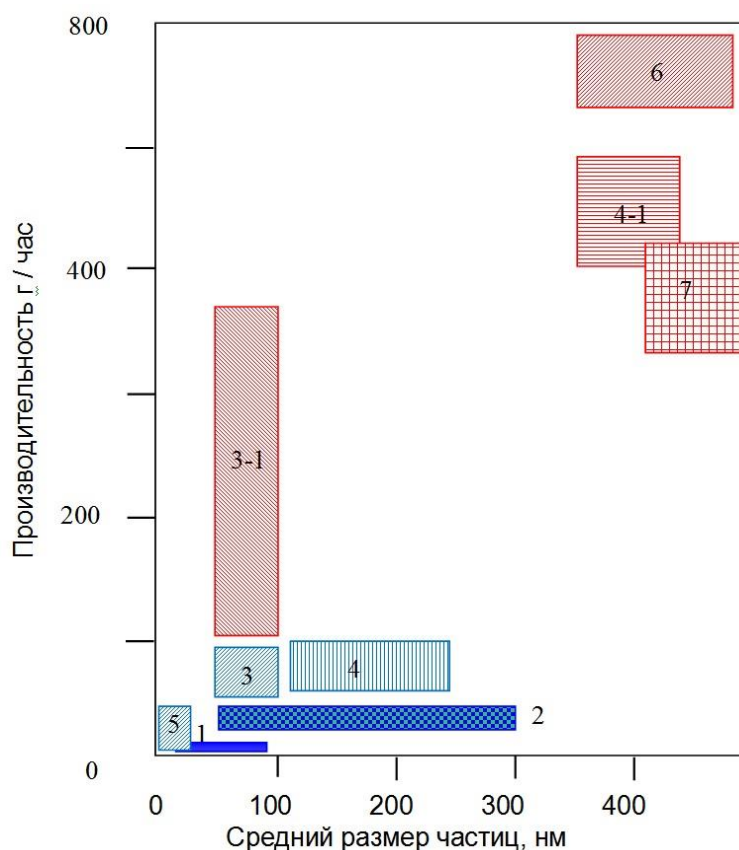


Рисунок 1 – Классификация различных методов синтеза нанопорошков по производительности в зависимости от размера частиц: синий цвет – металлы, красный цвет – соединения металлов (оксиды, карбиды, нитриды): 1 – метод испарения и конденсации (переконденсации, дистилляции), 2 – левитационно-струйный метод, 3 – электрический взрыв проводников, 4 – плазмохимический метод, 5 – химико-металлургический метод, 6 – самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), 7 – гидридно-кальциевый метод; 1, 2, 3, 4, 5 – металлы; 3-1, 4-1, 6, 7 – соединения металлов

В странах Европы (Германия, Франция), Азии (Япония, Корея, Китай) и Северной Америки (США, Канада) до 26 % всей выпускаемой продукции порошковой металлургии идет на производство деталей и заготовок для автомобилестроения [1; 2]. Второе место занимает авиационная промышленность – на ее долю приходится 12 %. Следует отметить, что авиационная промышленность стала пионером в применении аддитивных металлургических технологий для производства широкой номенклатуры изделий из порошков суперсплавов, титановых сплавов в различных агрегатах и узлах современных самолетов. Военная промышленность является заметным потребителем порошковых изделий: до 5 % от мирового объема выпуска. Такой же объем изделий порошковой металлургии (4–6 %) потребляют остальные отрасли: производство изделий медицинской техники (в первую очередь имплантаты и инструменты); электроника (ферриты, детали разъемов, системы охлаждения); энергетика

(вкладыши и опоры генераторов и турбин, корпуса задвижек, коллектора, сильноточные контакты); химическая промышленность (коррозионно-стойкие элементы, носители катализаторов, фильтры); инструментальное производство (быстрорежущие и твердые сплавы, карбидостали). На рис. 2 представлены области использования различных технологий порошковой металлургии в зависимости от объемов выпуска, габаритов и массы деталей [3].

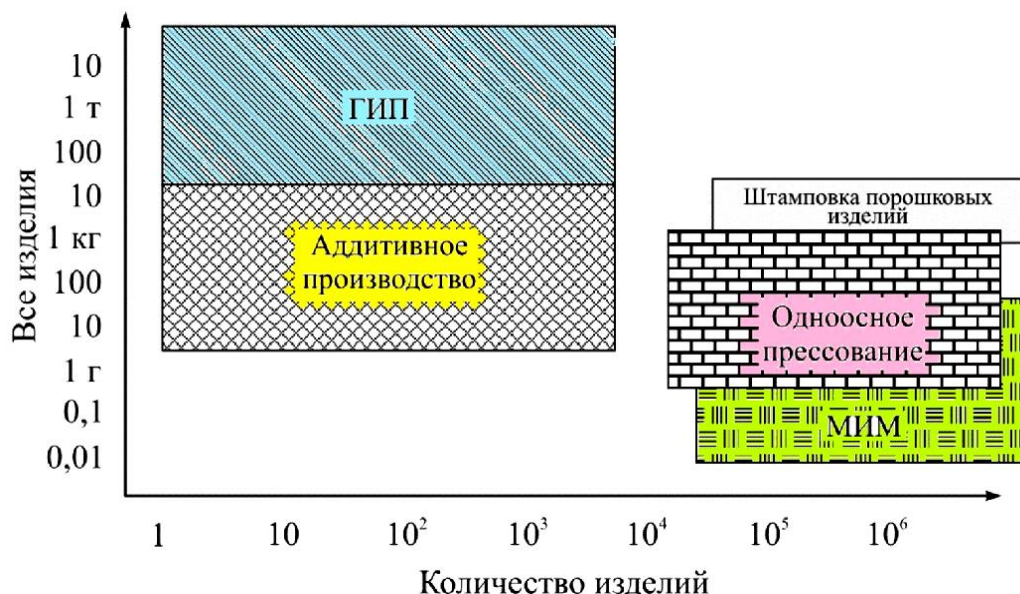


Рисунок 2 – Классификация технологий порошковой металлургии в зависимости от веса, размера и количества деталей: ГИП (HIP) – технология горячего изостатического прессования; МИМ (Metal Injection Moulding) – литье металла под давлением

Как видно из рис. 2, методы горячего изостатического прессования (HIP) и аддитивные металлургические технологии пока не могут обеспечить массовое и крупносерийное производство, но позволяют получать детали массой до 100 кг (аддитивные технологии) и даже свыше 1 т (HIP). В то же время технологии Metal Injection Moulding (microMIM) позволяют в массовом производстве получать точные и сложные детали весом от 0,01 г.

Развитие многочисленных отраслей новой технологии связано с использованием материалов, основой которых является все более широкий класс неорганических тугоплавких соединений (карбиды, нитриды, бориды и другие). Которые, помимо высоких температур плавления, обладают высокой стойкостью, высокими огнестойкими и антикоррозийными свойствами в комплексе с важными электрофизическими характеристиками [2; 23]. Получение наноструктурных огнеупорных материалов в промышленных масштабах требует поиска новых и разработки существующих методов их синтеза. Технология неорганических материалов широко использует процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), открытого академиком А. Г. Мержановым с соавторами в 1967 году. Это автоволновой процесс, похожий на распространение волны горения, когда химическая реакция находится в зоне горения, которая самопроизвольно распространяется на реагирующую среду из смеси исходных порошков [3]. Процесс синтеза высокотемпературного материала осуществляется в экстремальных условиях: температура синтеза – до 4000°C, скорость повышения температуры 10³–10⁶ градусов/с, скорость сгорания 0,1–10 см/с. Одновременное химическое превращение и структурообразование влияют не только на химический и фазовый состав образующихся продуктов, но также на морфологию и размер частиц [6; 7; 13; 23]. В наше время разработаны методы синтеза широкого класса соединений [4–5].

Технологии консолидации нанопорошков

В технологиях консолидации порошка можно выделить два основных метода. Первый – это формование материала, прессованного при комнатной температуре с последующим спеканием, второй, называемый спеканием под давлением, – это одновременное прессование и спекание порошков.

Прессование нанопорошков. При прессовании или компактировании порошка целевой продукт формируется и уплотняется при приложении к нему давления. Для прессования нанопорошков при комнатной температуре используются статическое одноосное прессование, динамическое магнитное импульсное прессование, комплексное прессование (изостатическое), ультразвуковое уплотнение, интенсивная пластическая деформация, прокатка ленты [1; 2]. Разнообразие методов уплотнения обеспечивает широкие технологические возможности для производства высокоплотных и пористых материалов. На дисперсию дисперсных порошков существенное влияние оказывают такие параметры, как средний размер частиц, содержание примесей, состояние поверхности, форма частиц, способ прессования и наличие сильных агломератов частиц, как показано на рисунке 3 [19].

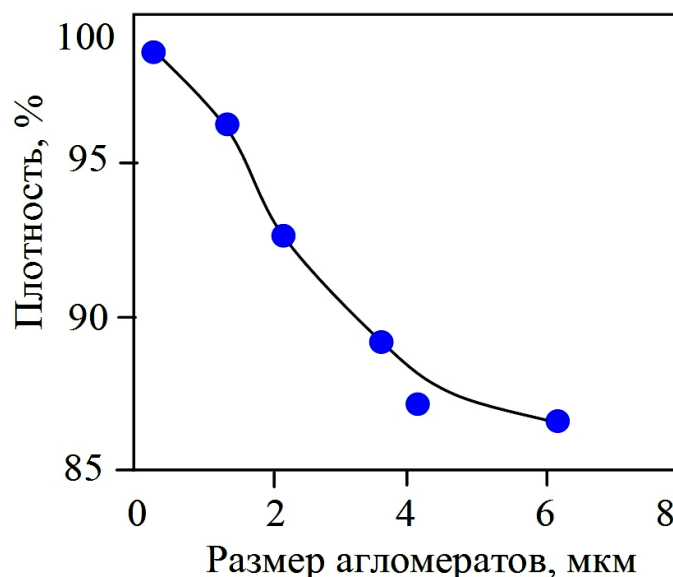


Рисунок 3 – Влияние размера агломератов из наночастиц $ZrO_2-Y_2O_3$ на плотность после спекания при $1500^{\circ}C$ в течение 4 часов [19]

Одноосное прессование более широко используется для консолидации нанопорошков: статическое прессование (в пресс-формах, штамповка), динамическое прессование (магнитный импульс, взрывное), вибрационное прессование (ультразвуковое). Комплексное (изостатическое) сжатие используется для получения материалов высокой плотности и однородности: гидростатическое, газостатическое, квазигидростатическое (в специальных формах высокого давления). В настоящее время успешно применяется метод интенсивной пластической деформации кручения под высоким давлением. В некоторых случаях используется прокатка для изготовления лент.

По мере уменьшения размера частиц плотность прессовки значительно уменьшается. Ранее был установлен критический размер частиц $d_{кр}$ (для железа $d_{кр}$ около 23 нм), ниже которого частицы становятся бездислокационными. Если размер частиц больше, чем критический размер, то они могут деформироваться при уплотнении в условиях относительно низких давлений (для порошков железа порядка 2 ГПа), а при увеличении давления возрастает плотность компактов, как показано на рисунке 4, для размеров частиц в диапазоне от 14 до 90 нм [1; 6].

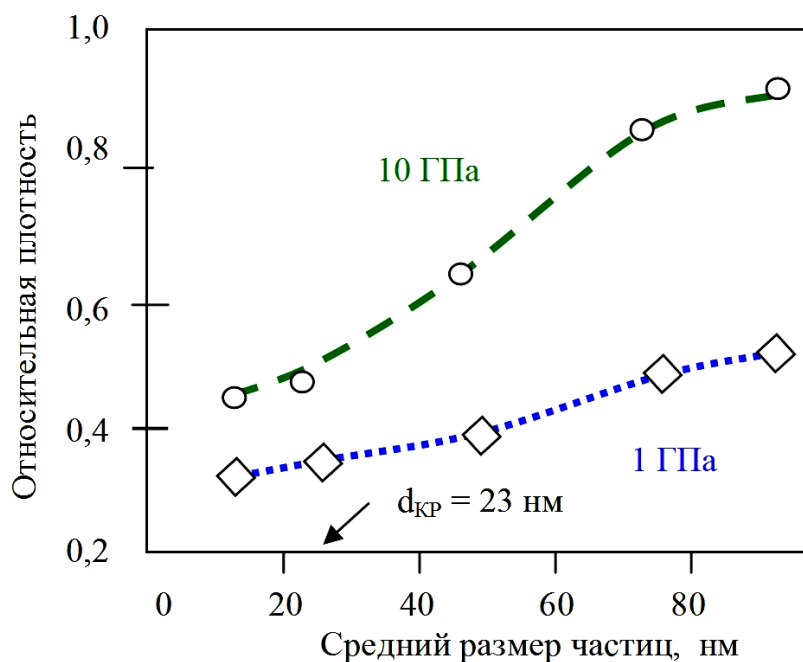


Рисунок 4 – Зависимость плотности прессовки нанопорошков железа от среднего размера частиц при квазигидростатическом прессовании

Если размер частиц меньше критического, они являются бездислокационными, поэтому нанопорошок не может пластически деформироваться до больших значений деформации, и его уплотнение не происходит во время компактирования. Однако в серии исследований нанопорошков Pd, Cu и Ag с использованием метода прессования *in situ* при давлении 1,6–5 ГПа были получены компакты нанопорошков Pd, Cu и Ag с плотностью примерно 98 % методом испарения-конденсации в вакууме [7; 8].

Спекание нанопорошков без давления (или свободное спекание). Спекание представляет собой термически активированный или инициируемый извне переход контактной системы твердых или пористых сред в термодинамически более сбалансированное состояние путем уменьшения площади свободной поверхности [9]. Спекание используется для получения непористых и пористых веществ (изделий) из порошков при повышенных температурах. Спекание осуществляется путем нагревания и поддержания порошкового формования при температуре ниже температуры плавления основного компонента. Чтобы определить механизмы, которые управляют различными этапами процесса спекания, проводится анализ термоактивации: определяются энергия активации, коэффициент предэкспоненты и степенной фактор.

Спекание, одна из важнейших технологических операций порошковой металлургии, представляет собой сложный многостадийный кинетический процесс объединения дисперсной системы, являющий собой компактный порошок для баланса. Определение механизмов спекания позволит получить заданную структуру спеченного тела, чтобы придать физико-механические или физико-химические свойства, определенные этой структурой. Отклонение равновесного пылевого конгломерата объясняется наличием несовершенных пор и контактов между частицами, концентрацией в неоднородностях, микроискажениями кристаллической решетки и развитой системой границ зерен. Основной движущей силой спекания является наличие избыточной энергии на свободной поверхности. Другие параллельные процессы возврата и рекристаллизации, которые стремятся приблизить систему к равновесию, к спеканию не относятся.

В настоящее время принимается, что в процесс спекания кристаллических частиц вносят вклад следующие основные механизмы (см. рис. 5, табл. 1). Все они ведут к росту перешейка между частицами. Но только для механизмов 4–7 центры частиц смещаются друг к другу, что приводит к уплотнению.

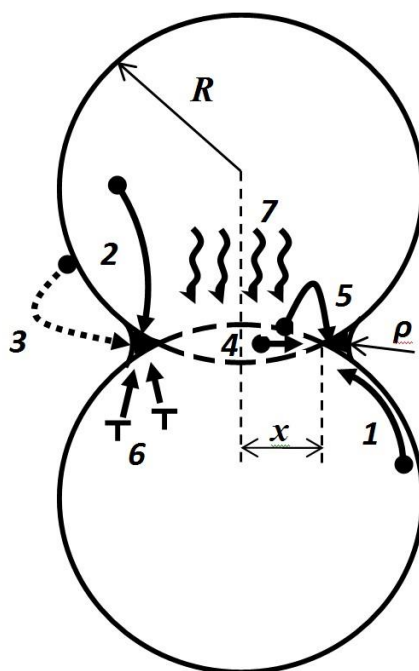


Рисунок 5 – Механизмы спекания (классификация в таблице 1)

Таблица 1 – Механизмы спекания

№	Механизм	Источник материала	Сток материала
1	Поверхностная диффузия	Поверхность	Перешеек
2	Объемная диффузия	Поверхность	Перешеек
3	Пар	Поверхность	Перешеек
4	Зернограничная диффузия	Граница зерен	Перешеек
5	Объемная диффузия	Граница зерен	Перешеек
6	Объемная диффузия	Дислокации	Перешеек
7	Вязкое течение	Объем частицы	Перешеек

Анализ экспериментальных кривых сжатия как функции времени показывает, что можно выделить несколько этапов процесса усадки, процесс спекания происходит более интенсивно на первом этапе. В этом случае рост частиц порошка заканчивается в конце сокращения. Поскольку стадия активного спекания занимает несколько минут, вклад диффузии в процесс расширения частиц незначителен. Второй и третий этапы спекания контролируются диффузией.

Спекание нанопорошков без давления при относительно низких температурах также предотвращает образование мелкого зерна без пор. При высоких температурах плотность образцов возрастает, но одновременно увеличивается размер зерна. До некоторой степени проблему можно решить путем нагревания высокоскоростными микроволнами, что позволяет увеличить линейную усадку при спекании нанопорошков [10]. Для контроля технологических режимов нагрева пылевых частиц необходимо использовать методы высокоскоростной оптической микропирометрии [20–22].

Перспективным методом является двухстадийное спекание, которое позволяет получать беспористый материал при сохранении размера зерна. В случае контролируемого изотермического спекания отсутствие пористости компактных оксидов иттрия достигается при увеличении зерна до 400 нм. Контролируемое спекание в два этапа: с перегревом до 1250–1310°C и последующее спекание при 1150°C позволяют достичь размера зерна примерно 100 нм при отсутствии пористости в этих компактах [11].

Спекание нанопорошков под давлением. При свободном спекании диффузионная масса переносится на перешеек между частицами. Во время спекания под давлением к существующим механизмам спекания добавляется пластическая деформация частиц под действием внешнего давления. Это приводит к значительному увеличению скорости уплотнения и

более высокой плотности материала и, следовательно, увеличению механического сцепления. Во время спекания под давлением вместе с процессом уплотнения происходят процессы возврата и рекристаллизации. Увеличение давления во время спекания может привести к снижению температуры процесса и, следовательно, замедлить процесс перекристаллизации, что помогает сохранить наноструктуру. Следовательно, спекание компактных нанопорошковых компактов не только уплотняет компакты до почти непористого состояния, но также сохраняет наноструктуру материалов.

В отличие от свободного спекания, горячее прессование осуществляется с помощью специальной оснастки на более сложном оборудовании. Особенно эффективные способы синтеза под давлением предназначены для изготовления трудноспекаемых материалов, таких как тугоплавкие соединения и композиционные материалы. Выбор конкретного способа агломерации под давлением для конкретного материала зависит от типа компонентов, формы и размера изделия, температуры процесса, совместимости формованного материала с инструментом для прессования материала. Для получения объемных плотных наноматериалов в массе используются методы спекания под давлением: горячее прессование под воздействием статических или динамических нагрузок, горячая экструзия, горячая прокатка, электроразрядное спекание.

Области применения

В настоящее время растет интерес к твердым сплавам: карбиду вольфрама и карбиду кобальта. В России ежегодно используется около трех тысяч твердых сплавов, а треть этой суммы закупается за рубежом. Российские компании производят только средние и крупнозернистые твердые сплавы. В то же время во всем мире производство тонкодисперсных сплавов значительно увеличивается. Проблема повышения качества твердых сплавов во всем мире решается с помощью их наноструктурирования [1; 8; 12].

Для получения нанопорошков карбида вольфрама разработан двухстадийный процесс, который включает плазмохимический восстановительный синтез ультрадисперсной многофазной системы вольфрам-углерод (W-C) и низкотемпературный синтез из этих порошков однофазного монокарбида вольфрама [12–13].

Было изучено несколько вариантов спекания наноструктур сплава: горячее прессование, спекание в воде, вакуумное и вакуумное спекание. Используя более низкие температуры горячего прессования, можно получить твердые сплавы с размером зерна 0,1–0,4 мкм и рядом свойств, которые превосходят традиционные свойства на 20–40 %. Однако этот метод требует дорогостоящего оборудования и еще не используется на заводах в нашей стране. Исследование других вариантов спекания показало возможность получения твердых сплавов с размером зерна менее 0,5 мкм. В то же время его твердость, прочность и производительность значительно улучшаются.

Исследования высокоскоростной консолидации нанополитов чистого карбида вольфрама методом электроимпульсного плазменного спекания [13] показали, что образцы, полученные из высокоструктурного наноструктурированного карбида вольфрама, имеют высокие значения твердости (до 31 ГПа) и трещиностойкости ($5,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

Образование наноструктур в глубоких оболочках бронебойных подкалиберных снарядов из **тяжелых вольфрамовых сплавов** усиливает склонность материала к локализации деформации и дальнейшему разрушению путем отслаивания чешуек, что должно улучшать служебные свойства ударников. Важно сохранить наноструктуру при консолидации нанопорошков. Из нанопорошков тяжелого вольфрамового сплава системы W-Ni-Fe-Co (размер частиц приблизительно 100 нм), синтезированного химико-металлургическим методом, получают компактный материал с $\sim 17,4 \text{ г/см}^3$ и размером зерна вольфрама 2,4–4,6 мкм [14]. Сплавы из нанопорошков тяжелых вольфрамовых сплавов имеют более высокие механические свойства, чем стандартные сплавы: твердость по Виккерсу сплава из нанопорошков после твердофазного спекания в 2,5 раза выше, чем заводского сплава после жидкофазного спекания, и в 1,4 раза выше, чем заводского сплава после дополнительной упрочняющей обработки. Предел текучести и временное сопротивление на сжатие при комнатной температуре мелкозернистых тяже-

лых вольфрамовых сплавов, полученных из нанопорошков твердофазным спеканием при 1350°C, на ~55 и ~35 % больше, чем прочностные характеристики промышленных сплавов.

Одним из перспективных способов повышения пластичности и вязкости разрушения **керамических материалов** является наноструктурирование. Керамика на основе Si_3N_4 используется в машиностроении (лезвия режущих инструментов), для изготовления износостойких элементов текстильного оборудования (втулки, кольца, пластины), высокотемпературных деталей, износостойких высокопроизводительных гибридных и полностью керамических подшипников, элементов и компонентов горячего газотурбинного двигателя, двигателей, в керамической и ювелирной промышленности, в стеклянной посуде, в оптике (опорные пластины для оптических приборов), в химической промышленности (клапаны, сопла, уплотнения, прокладки, которые работают в агрессивных средах).

Спекание порошков нитрида кремния Si_3N_4 проводится при высоких температурах (1700–2000°C) или при горячем прессовании. Чтобы избежать диссоциации Si_3N_4 , процесс проводят в атмосфере азота (2–200 МПа). Для улучшения и снижения температуры спекания используются добавки, в основном различные оксиды (магний, иттрий, алюминий, титан и т. д.). В [15] порошок Si_3N_4 , полученный методом высокотемпературного самораспространяющегося синтеза, который представляет собой волокнистую частицу нитрида кремния со средней длиной приблизительно 2 мкм и толщиной до 200 нм. Механическая прочность на изгиб прессовок полученных компактов при температуре 1400°C достигала 400 МПа.

Задача поиска новых легких защитных материалов и конструкций сегодня актуальна как никогда. Это особенно верно для **прозрачных броневых материалов**. В этом классе материалов наиболее перспективной является прозрачная поликристаллическая керамика, в частности керамика на основе оксинитрида алюминия, общепринятая аббревиатура AlON. Этот материал обладает уникальным набором свойств, необходимых для использования в средствах защиты брони. Возможно получение прозрачных изделий сложным способом с использованием традиционных способов керамического формования и спекания. Мы реализовали два варианта жидкофазного синтеза оксинитрида алюминия. В первом варианте кристаллический гидрат нитрата алюминия и глицин использовали в качестве исходных компонентов. После азотирования в аммиаке при 1200°C полученное соединение имело содержание AlON 95 %. Для второго варианта жидкофазного синтеза были использованы органические исходные материалы. В этом варианте AlON был получен без появления посторонних соединений, но практическая важность результатов незначительна из-за высокой стоимости органических соединений алюминия. Поэтому работа по синтезу оксинитрида алюминия со 100 % выходом конечного продукта из дешевых неорганических солей продолжается [16].

В последние годы были разработаны **новые медицинские технологии** в костной хирургии, основанные на применении материалов на основе фосфата кальция в нанодисперсном состоянии. Титановая керамика на основе гидроксиапатита совместима с организмом человека и может использоваться в качестве материала для имплантатов. Размер зерна, поры и состояние поверхности гидроксиапатитовой керамики влияют на его биологическую активность. При изготовлении керамики исходный материал подвержен переходу различных физических и химических превращений при переходе нанопорошка на заготовку требуемой формы и размеров.

В работе [11] исследовали прессование и последующее спекание нанопорошков гидроксиапатита, полученных двумя способами: осаждение водных растворов (I) и синтез гетерофазы (II). Размер частиц порошков I и II не превышал 50 и 100 нм соответственно. В оптимальном режиме прессования относительная плотность кусков достигает 60 %. Предварительное вакуумирование во время прессования порошка способствует формированию более однородной керамической структуры. Предел сопротивления керамики, получаемой без вакуумирования, составляет 25 МПа, при предварительном вакуумировании – 20 МПа. Меньшее значение прочности связано с большей открытой пористостью.

Выводы

Консолидированные порошковые наноматериалы могут быть применены в форме порошков, покрытий и объемных материалов [1; 9; 18; 19]. Однако некоторые свойства наноматериалов еще недостаточно используются. Например, высокие механические и многофункциональные свойства нанометаллов следует использовать в микроэлектромеханических системах, которые изготавливаются из деталей размером несколько микрон. В случае использования обычных поликристаллов границы зерен будут пересекать деталь вдоль поперечного сечения и уменьшать ее прочность и надежность. При изготовлении микрочастиц, таких как микрозубчатые колеса, микро-пружины, сборки сложной формы и другие, преимущества функциональных и структурных свойств интеллектуальных наноматериалов очевидны.

Литература

1. Bulk Nanocrystalline Metals: Review of the Current State / M. A. Tschopp [et al.] // JOM. – 2014. – Vol. 66. – Iss. 6. – P. 1000–1019.
2. Correlation between a quality of nanopowders and productivity rater of fabrication technology of them / M. I. Alymov [et al.] // Composites and Nanostructures. – 2012. – № 3. – P. 5–9.
3. Technology of self-propagating high-temperature synthesis of nanosized powders of refractory compounds / I. P. Borovinskaya [at al.] // Nanotechnology in Russia. – 2007. – № 3. – P. 114–119.
4. Научно-технические разработки в области СВС : справочник / под общей редакцией А. Г. Мержанова. – Черноголовка, 1998. – 192 с. – Текст : непосредственный.
5. ASM Handbook : Vol. 7: Powder Metallurgy. – ASM International, 2015. – 907 p. – ISBN 978-0871703873.
6. Thermal analysis of reaction producing K_xTiO_2 / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova, M. Boronenko [at al.]. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131. – № 1. – P. 561–566.
7. In-situ selfpropagating-hightemperature-synthesis controlled by plasma / H. Z. Cui, P. Yu. Gulyaev, I. P. Gulyaev, I. V. Milyukova // Bulletin of ugra state university. – 2012. – № 2 (25). – P. 28–33.
8. Qin, X. Y. The microhardness of nanocrystalline silver / X. Y. Qin, X. J. Wu, L. D. Zhang // Nanostr. Mater. – 1995. – Vol. 5. – № 1. – P. 101–110.
9. Гуляев, П. Ю. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11. – № 5-2. – С. 382–385.
10. Bykov, Y. V. Microwave sintering of nanostructured ceramic materials / Y. V. Bykov, K. I. Rybakov, V. E. Semenov // Nanotechnologies in Russia. – 2011. – Vol. 6. – № 9-10. – P. 647–661.
11. Chen, I. W. Sintering dense nanocrystalline ceramicswithout final-stage graingrowth / I. W. Chen, X. H. Wang // Nature. – 2000. – Vol. 404. – № 9. – P. 168–171.
12. Kurlov A.S. et al. Hard alloys WC-Co (6 wt %) and WC-Co (10 wt %) based on nanocrystalline powders / Doklady Chemistry. 2011. V. 439. P. 213.
13. Boronenko, M. P. Phase formation time evaluation in NiAl combustion systems by the thermal fields visualization method / M. P. Boronenko, P. Yu. Gulyaev // Scientific Visualization. – 2015. – Vol. 7(5). – P. 102–108.
14. Поварова, К. Б. Тяжелые вольфрамовые сплавы на основе нанопорошков / К. Б. Поварова, М. И. Алымов, А. А. Дроздов. – Текст : непосредственный // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2 (54). – С. 94–99.
15. Гуляев, П. Ю. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35. – № 1.1. – С. 144–148.

16. Синтез оксинитрида алюминия СВС-методом в азотсодержащих алюмогелях / А. В. Галахов [и др.]. – Текст : непосредственный // Новые огнеупоры. Специальный выпуск. – 2014. – № 3. – С. 47–48.
17. Гуляев, П. Ю. Автоматизация контроля теплофизических параметров в технологиях детонационного напыления / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35. – № 1.2. – С. 230–233.
18. . Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напыления / М. П. Бороненко [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-6. – С. 1194–1199.
19. Шевченко, В. Я. Техническая керамика / В. Я. Шевченко, С. М. Баринков. – Москва : Наука, 1993. – 187 с. – Текст : непосредственный.
20. Гуляев, П. Ю. Методы оптической диагностики частиц в высокотемпературных потоках / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов, Г. Н. Леонов. – Текст : непосредственный // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2-1. – С. 4–7.
21. Гуляев, П. Ю. Оптико-электронная система диагностики двухфазных потоков динамическим методом счета частиц / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 9-3. – С. 79–87.
22. Гуляев, И. П. Разрешающая способность виртуальных приборов контроля температуры частиц в плазменных потоках по суммарному спектру / И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. – С. 13–14.
23. Song, X. J. Microstructure and evolution of (TiB₂+Al₂O₃)/NiAl composites prepared by selfpropagation high-temperature synthesis / X. J. Song, H. Z. Cui, L. L. Cao. – DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64265-6 // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26. – № 7. – P. 1878–1884.
24. Arc-Plasma Wire Spraying: An Optical Study of Process Phenomenology / I. P. Gulyaev, A. V Dolmatov, M. Yu. Kharlamov [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24. – № 8. – P. 1566–1573.