ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 2.

УДК 903.05:669.053

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-2-437-448

**История развития порошковой металлургии
и ее применение в современных технологиях**

А. Н. Кубанова, А. Е. Гвоздев

Кубанова Анастасия Николаевна — младший научный сотрудник, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: chureychik@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Аннотация

В работе дано пояснение термина «порошковая металлургия» и определены основные отличия от классических способов металлургии. Описаны исторические аспекты развития технологий порошковой металлургии с древних времен. Представлены основные технологические методы порошковой металлургии и их применение для производства современных продуктов. Перечислены основные области применения различных типов продуктов современной порошковой металлургии.

Ключевые слова: порошковая металлургия, история развития порошковой металлургии, технологические процессы порошковой металлургии, типы продуктов порошковой металлургии, области применения порошковой металлургии.

Библиография: 13 названий.

Для цитирования:

А. Н. Кубанова, А. Е. Гвоздев. История развития порошковой металлургии и ее применение в современных технологиях // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 2, с. 437–448.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 2.

UDC 903.05:669.053

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-2-437-448

**History of powder metallurgy development
and its application in modern technologies**

A. N. Kubanova, A. E. Gvozdev

Kubanova Anastasia Nikolaevna — junior researcher, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: chupeychik@mail.ru

Gvozdev Alexander Evgenievich — doctor of technical sciences, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Abstract

The article explains the term "powder metallurgy" and defines the main differences from the classical methods of metallurgy. Historical aspects of the development of powder metallurgy technologies since ancient times are described. The main technological methods of powder metallurgy and their application for the production of modern products are presented. The main areas of application of various types of products of modern powder metallurgy are listed.

Keywords: powder metallurgy, history of development of powder metallurgy, technological processes of powder metallurgy, types of products of powder metallurgy, areas of application of powder metallurgy.

Bibliography: 13 titles.

For citation:

A. N. Kubanova, A. E. Gvozdev, 2021, "History of powder metallurgy development and its application in modern technologies", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 2, pp. 437–448.

Понятие «Порошковая металлургия». Ее история возникновения и развития.

Порошковая металлургия — область техники, охватывающая совокупность методов изготовления порошков металлов и металлоподобных соединений, полуфабрикатов и изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками без распыления основного компонента [1]. Сущность порошковой металлургии заключается в производстве порошков и изготовлении изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками [2]. Принципы процесса порошковой металлургии применяются к керамическим материалам, полимерам, композиционным материалам, состоящим из металлических и неметаллических компонентов [3]. Среди неметаллических компонентов в изделиях порошковой металлургии наиболее широко представлены керамические порошки (оксиды, карбиды, нитриды, бориды и др.). Композиционные порошки — это порошки, частицы которых состоят из химически разнородных компонентов (двух и более) и (или) фаз, разделенных четко выраженной границей. Наиболее широко применяются в изделиях порошковой металлургии порошки из различных металлов и сплавов.

Основными достоинствами порошковой металлургии (как метода изготовления материалов и изделий) являются следующие [4]:

- изготовление материалов и изделий из этих материалов, которые традиционными металлургическими способами получить крайне затруднительно, а на примере тугоплавких материалов (вольфрам, молибден, тантал) — невозможно;
- использование отходов металлургического и машиностроительного производства (окалина, стружка, гальванические шламы и т. п.) в качестве исходного сырья для производства порошковых изделий;
- существенное снижение отходов за счет производства изделий с размерами и формой, близкими к конечным.

К недостаткам порошковой металлургии можно отнести:

- ограниченность в выборе форм и размеров изготавливаемых изделий и заготовок;
- сравнительно невысокое рафинирование по примесям, что, например, препятствует использованию методов порошковой металлургии в изготовлении монокристаллов и полупроводников.

Однако эти недостатки могут быть устранены за счет изготовления составных изделий или применения комплекса технологических процессов, включающих наряду с порошковой металлургией другие технологии.

Порошковая металлургия является одной из самых интересных и инновационных технологий производства, получивших основное развитие с начала XX века. Несмотря на свое относительно недавнее вхождение в производственный сектор современной экономики, технологические принципы порошковой металлургии существуют уже на протяжении тысячелетий [5].

Одной из важных характеристик процесса порошковой металлургии является формообразование металлических предметов из порошкообразных материалов без плавления. Следовательно, многие металлические предметы древних цивилизаций можно считать изготовленными с применением принципов порошковой металлургии [3].

В древние времена основными применениями порошковой металлургии были ювелирное дело, изготовление красок, оружие из железа. В качестве материалов для изготовления порошков использовались: золото, серебро, медь, платина, бронза, свинец, железо [3]. Первые упоминания об изготовлении железных, золотых и серебряных украшений датируются 3000 г. до н.э. и были обнаружены в древнеегипетских рукописях [3, 5]. Древние Египтяне знали обуглероживание железа в 1200 году до н.э., а также технику закалки железа в 900-700 годах до н.э., которая позже так же использовалась в Римской империи. Об этом свидетельствуют кинжалы, украшенные золотым порошком, найденные в гробнице египетского фараона Тутанхамона, жившего в XIV в. до н.э. Изготовление порошков в основном осуществлялось путем механического измельчения в ступе, механического разложением в воде или путем восстановления оксидов.

В Греции в 800-600 г. до н.э. было широко распространено производство порошковых железных орудий. В те времена единственным способом получения предметов из железа было уплотнение кусков губчатого железа до нужной формы. Железные губки получали восстановлением железной руды в угольных кострах. Большинство изделий, изготовленных таким способом, были ограничены по размеру и весили несколько килограммов [3].

Спустя столетия в интервале 35 – 414 гг. н.э. в Индии был создано первое для своих масштабов крупногабаритное изделие из железного порошка — Делийская колонна — весом порядка 6,5 тонн [5]. Ее изготовление осуществлялось прямым восстановлением оксида железа без плавления, в связи с отсутствием технологии плавления еще до XIX века.

Принципы порошковой металлургии также использовались арабами и немцами в X в. н. э. для изготовления своих высококачественных мечей из железного порошка. Для их изготовления железный порошок многократно подвергался горячей ковке, пока содержание углерода не станет достаточно низким и примеси не будут мелко диспергированы в железной матрице.

Эти принципы процессов порошковой металлургии для получения железа и стали были забыты и заменены металлургией расплавленного железа с развитием высокотемпературных печей для восстановления и обработки железа и стали в XVII и XVIII веках [3].

Порошковая металлургия получила бурное развитие в конце XIX — начале XX века. Среди открытий, созданных благодаря технологиям порошковой металлургии, обозначенного периода следует отметить нить накаливания из порошка вольфрама, давшую неоспоримый скачек развития в области электричества.

Современное порошковое спекание появилось в конце XIX века, наряду с развитием и расширением использования электричества. Поскольку тонкие проволоочные нити заменили электрические дуги, потребность в прочной вольфрамовой проволоке увеличилась. Развитие производства вольфрамовой нити связано с В. Д. Кулиджем, который получил свой патент в 1909 г. Процесс Кулиджа состоит из брикетирования порошка вольфрама в форму, которая спекается в защитной атмосфере и затем обжимается при высоких температурах, чтобы уменьшить его поперечное сечение и улучшить пластичность, пока не будет достигнута стадия, когда металл становится пластичным при комнатной температуре и может быть вытянут в проволоку. Все высокотемпературные операции проводились ниже температуры плавления вольфрама. Позже, другие тугоплавкие металлы, такие как молибден, тантал и ниобий были также обработаны по процессу Кулиджа. Было установлено, что при добавлении тонкодисперсного оксида тория в вольфрам во время обработки последнего, уменьшается роста зерна вольфрама во время свечения вольфрамовой нити в лампе накаливания. Это значительно увеличило сопротивление нити к провисанию и охрупчиванию. Кроме того, было установлено, что возможно формировать нити в катушки очень малого диаметра, что значительно повышает эффективность электрических ламповых нитей.

Это развитие можно рассматривать как современный Ренессанс порошковой металлургии, где процесс спекания использовался для изготовления нитей для производства электрических ламп накаливания [3]. Именно этот период времени принято считать началом освоения одного из методов порошковой металлургии — спекания, позволяющему получить компактные заготовки тугоплавких материалов пригодных для дальнейшей деформации.

Следующий прогресс в порошковой металлургии произошел с изготовлением пористых металлических заготовок, с целью их последующей пропитки смазочными материалами. Около 1910 года было получено несколько патентов, в том числе на производство бронзовых материалов с графитом [3].

Начало современному периоду развития порошковой металлургии положил отечественный ученый Соболевский П. Г., который в сотрудничестве с Любарским В. В. в 20-х годах XIX века разработал особый метод производства разнообразных изделий, используя платиновый порошок. С открытия данного метода началось ускоренное развитие порошковой металлургии, открывающей возможность создавать изделия с по-настоящему эксклюзивными свойствами, добиться которых иными способами невозможно и по сей день. Примерами могут являться пористые подшипники или приспособления для фильтрации.

Благодаря открытиям в области порошковой металлургии стали появляться материалы на основе систем оксидов и систем металл-полимер, а их структуру можно заранее спрогнозировать и даже задать [6]. Производство цементированных карбидов началось в 1922 году, что произвело революцию в механической обработке и металлообработке. В это время были разработаны такие продукты, как тяжелые сплавы вольфрама, цементированные мультикарбиды, контактные материалы, а также открыты такие методы, как жидкофазное спекание и инфильтрация (процесс заполнения пор спекаемого или не спекаемого компакта металлом

или сплавом с низкой температурой плавления). Основными потребителями продукции традиционной порошковой металлургии являлись предприятия автомобильной промышленности [7].

1930-е годы ознаменовались появлением порошковых металлических масляных насосов вместе со спеченными магнитными материалами. В это же время на немецком языке вышла первая современная книга о порошковой металлургии «Metal Ceramics» (1930 г.), а позже (1933 г.) она же была переведена на русский язык [3]. В военные годы 1940-ых годов порошковая отрасль металлургии получила новое веяние в развитии. Немецкие инженеры добавили компоненты огнестрельного оружия к растущему списку металлических порошковых продуктов [8].

После Второй мировой войны резко вырос спрос на автомобилестроение. Вместе с ним вырос спрос и на производство спеченных металлических деталей. Безусловно это было связано с разработкой более высококачественных материалов и усовершенствованием технологий их уплотнения в заготовки и изделия.

В 1944 г. рядом предприятий была создана первая Ассоциация металлического порошка (англ. MPA — Metal Powder Association), основной задачей которой было расширение рыночной базы металлического пороха. В период 1950-х гг., в связи с прекращением масштабных военных действий в мире, MPA была переименована в Федерацию производств порошковой металлургии (англ. MPIF — Metal Powder Industries Federation) [5]. Целью данной ассоциации было развитие отрасли порошковой металлургии в отношении стандартов, образования, связей с общественностью посредством конференций. Благодаря обмену опытом участникам ассоциации удалось совершить серьезный прорыв как в своих собственных технологических процессах, так и в сфере развития порошковой металлургии в целом. Со временем, благодаря общим усилиям компаний-участников ассоциации производство ряда изделий, получаемых традиционными классическими металлургическими процессами (механическая обработка, литье под давлением), было переведено на технологии порошковой металлургии, позволяющими достичь снижения себестоимости производства без потери качества продукции.

Позднее появились два связанных с порошковой металлургией процесса: литье порошкового металла под давлением с 1980 года (англ. MIM — Metal Injection Molding) и аддитивное производство (англ. AD — Additive Manufacturing) с 2000 года. Основным и принципиальным отличием данных процессов является единовременная много осевая обработка порошкового металла в форме близкой к конечной геометрии готового изделия.

По сей день технологические процессы отрасли порошковой металлургии неуклонно развиваются и позволяют получать новые материалы. Примерами последних открытий и разработок являются [5, 9]:

- псевдосплавы из несплавляемых литьем компонентов с управляемыми механическими, магнитными и другими характеристиками;
- металлические порошки с уровнем сферичности до 99%, применяемые в области построения изделий методами аддитивных технологий;
- сложнолегированные композиции металлических сплавов, в основе которых лежит совокупность легко- и тугоплавких материалов;
- разработка и получение широкого спектра сплавов и смесей (оксид бериллия, карбид кремния, чистый титан и др.), получение которых невозможно классическими металлургическими методами.

Современные области применения методов порошковой металлургии включают обработку ферритов, гранатов, пьезоэлектрических материалов для электронной промышленности,

а бериллия, суперсплавов и титановых сплавов для авиационной, аэрокосмической промышленности. Последние разработки в области порошковой металлургии позволяют создавать различные новые материалы и системы сплавов, адаптированные к конкретным технологическим требованиям. Технологии порошковой металлургии используются при изготовлении топливных элементов и для изготовления компонентов для аэрокосмических применений [10, 11].

Основные технологические процессы порошковой металлургии

В порошковой металлургии весь объем выполняемых технологических операций от исходного сырья до готового продукта можно разделить на следующие стадии:

- получение металлического порошка или смеси порошков, включая просев порошка по целевым фракциям;
- прессование (механическое прессование, гидростатирование) порошка или смеси порошков для формирования заготовок;
- спекание (спекание в печи, экструзия, горячее изостатическое прессование) заготовок;
- деформация (прокатка, ковка, прессование) заготовок;
- механическая обработка в готовое изделие.

Размер применяемых в области порошковой металлургии порошков варьируется в пределах от 1 нм до 0,5 мм. Для их получения прибегают к механическим и физико-химическим методам. Процесс получения металлических порошков напрямую зависит от природы сырьевого материала. Наиболее распространенными технологиями получения металлического порошка являются [2, 7, 12]:

- восстановление из сырьевых оксидов или солей;
- электролитическое осаждение;
- распыление струи расплавленного металла;
- термическая диссоциация;
- механическое измельчение (дробление) в специальных ударных мельницах, или оснащенных вращающимися частями.

Характер исходного материала определяет форму и свойства получаемых путем дробления частиц: если он хрупкий, то частицы получают осколочного вида, если пластичный — чешуйчатого. Пластическая деформация, которая характерна для раздробленных порошков, приводит к переформатированию присущих им свойств и структурному видоизменению [6].

Распыление (называемое также диспергированием) металлов и сплавов жидкой консистенции производят посредством струи жидкости или газа с применением форсунок различных форм. На свойства, форму и размер распыленных порошковидных веществ оказывает воздействие целый ряд факторов, включая поверхностное натяжение расплавленной массы, скорости, с которой осуществляется распыление, нюансов геометрии форсунок и физические свойства сплава. Распыление с применением воды нередко реализуется в азотной или аргонной среде. Таким способом получают железные, чугунные, стальные, никелевые и другие порошки. В роли газа для распыления может выступать воздух, азот, аргон, а также водяной пар. Существуют и другие методы распыления металла, в частности, плазменный, а также способ

разбрызгивания металлической струи в воду. Основное применение данные методы получили при изготовлении бронзовых, латунных, серебряных, оловянных и алюминиевых порошков [6].

Обязательным постпроцессом на стадии получения порошка является просев. Его осуществляют путем:

- физического просеивания через сита с определенным размером ячейки;
- каскадного разделения порошка на отдельные фракции;
- путем воздушного просеивания, основанного на эффекте Куанда.

Процесс прессования необходим для получения полуфабрикатов в виде прутков, труб, лент или отдельных заготовок, форма которых приближена к форме готовых изделий. В процессе компактирования сыпучий порошок преобразуется в плотную заготовку с пористой структурой, прочность которого позволяет ему сохранять приданную форму в ходе дальнейших операций по спеканию и деформации. Базовыми методами прессования являются [6]:

- прессование с одной или двух сторон в специальных металлических матрицах;
- прессование прокаткой;
- изостатическое прессование за счет давления газа или жидкости (гидростатическое прессование);
- мундштучное прессование;
- прессование с высокой скоростью, включая динамическое.

Прессование осуществляют как при комнатной температуре, так и в условиях высокотемпературной среды. В данном процессе порошок уплотняется за счет того, что его частицы смещаются по отношению друг к другу и впоследствии деформируются либо разрушаются. Применение достаточно большого давления при работе с порошками пластичных металлов позволяет добиваться уплотнения главным образом за счет пластической деформации, а при работе с хрупкими металлами и их соединениями – за счет разрушения и дробления частиц. Более высокой прочностью отличаются порошки, получаемые из пластичных металлов, а для придания необходимых прочностных характеристик порошкам из хрупких металлов дополнительно используют специальные связующие жидкие компоненты. В массовом производстве наиболее востребовано прессование порошков в жестких матрицах (прессформах) из металла, для чего используются таблетировочные, ротационные и иные пресс-автоматы с механическим или гидравлическим принципом действия. Получение заготовок в механическом прессе применяется, как правило, для изготовления малогабаритных заготовок.

Компактирование прокаткой подразумевает формирование заготовок из порошка в непрерывном режиме в валках прокатных станов. В валки порошок сыпается сам или подается принудительным способом. Прокатка позволяет получать листы, профили и ленты с пористой структурой.

Технология изостатического прессования предполагает помещение порошка или пористых заготовок в специальную оболочку с последующим ее вакуумированием, после чего материал сжимается рабочим газом со всех сторон при высокой температуре. В завершение процесса оболочку демонтируют. Изостатическое прессование, в зависимости от типа используемой рабочей среды, подразделяется на гидро- и газостатическое. Первый вариант в большинстве случаев осуществляется в условиях комнатной температуры, тогда как для второго необходимы высокие температуры. За счет изостатического прессования удается получать изделия,

отличающиеся сложной формой, и имеющие предельно однородную плотность по всему объему. Процесс прессования (формирования) заготовок путем холодного гидростатического прессования (гидростатирование) проводят при давлении до 2000 МПа в металлических формах с внутренней латексной оболочкой. Таким способом получают крупногабаритные заготовки, как правило, из тугоплавких материалов (вольфрам, молибден) с размерами до 0,7-0,8 м в диаметре и 1,9 м в высоту.

Принципом мундштучного прессования является продавливание сквозь отверстие в мундштуке порошка, смешанного с пластификатором. Данный способ применяется для сложно-прессуемых порошков, произведенных из хрупких металлов. Результатом подобной обработки становится получение длинных заготовок, имеющих однородный состав и равномерную плотность.

Финальной операцией изготовления изделий методом порошковой металлургии является спекание. Оно подразумевает термическую обработку заготовок в условиях, когда температура не достигает значения, необходимого для плавления, по крайней мере, одного из компонентов. Данная процедура необходима для того, чтобы повысить плотность изделия и придать ему определенные механические и физико-химические свойства. Вначале спекания частицы проскальзывают друг по отношению к другу, между ними формируются контакты, центры частиц сближаются. За счет процесса диффузии, возникающей при воздействии температуры спекания, пустоты между частицами сокращаются, их количество минимизируется и как следствие, возрастает плотность изделия. Для спекания в большинстве случаев используют защитную среду, представленную обычно инертными газами, восстановительную среду, в роли которой выступает водород или углеводородсодержащие газы, либо вакуум. Нагреваются изделия в электрических или индукционных печах либо за счет прямого пропускания тока [6].

Спекание прессованных заготовок проводят при температуре, составляющей 70-90% от температуры плавления основного материала заготовки [12]. При спекании смеси материалов максимальная когезия достигается вблизи температуры плавления основного компонента, а в цементированных карбидах — вблизи температуры плавления связующего. С повышением температуры и увеличением продолжительности спекания увеличиваются усадка, плотность и улучшаются контакты между зернами. Во избежание окисления материалов, спекание проводят в восстановительной атмосфере (водород), атмосфере нейтральных газов (аргон) или в вакууме [2, 7, 12].

Существует возможность совмещения в одной технологической операции и процесса прессования, и процесса спекания. Это осуществимо с применением операций горячей экструзии или горячего изостатического прессования, в которых исходным материалом является порошок, а готовым продуктом является плотная заготовка с размерами близкими к конечным [13]. Новые процессы в порошковой металлургии, используемые для получения материалов с высокими эксплуатационными свойствами, привели к значительному прогрессу в технологии производства порошков, прессования, спекания и обработки давлением [10].

Основные виды современных продуктов порошковой металлургии и области их применения.

Сегодня технологии порошковой металлургии используются преимущественно для обработки материалов, применяемых в атомной, электронной и аэрокосмической отраслях [1]. Основное применение порошковые металлические детали нашли и в инженерных системах [14]. Традиционно технология порошковой металлургии выбиралась из-за экономической эффективности. Однако, сегодня достигаемый уровень производительности, физико-механических характеристик и в целом качество готовых продуктов, произведенных по технологии порош-

ковой металлургии, значительно превосходит показатели классической традиционной металлургии. Изделия, произведенные из металлического порошка при правильно подобранной технологии, имеют однородные свойства по всем сечениям. Кроме того, диапазон применений порошковой металлургии также расширился от когда-то узкого рынка самосмазывающихся подшипников до таких несопоставимых областей, как медицинские технологии и компьютерная техника. Например, производство порошковых металлов обеспечило решение проблем рассеивания тепла с кремнием в электронных системах, позволяя создавать радиаторы с низким тепловым расширением и высокой теплопроводностью. В сфере здравоохранения развитие отрасли порошковой металлургии привело к созданию биомедицинских имплантатов, имеющих хорошую биосовместимость с телом человека и контролируемую ликвидацию свойств по сечению.

Продукция порошковой металлургии используется в различных отраслях промышленности [2, 7, 12]. Круг изделий, изготавливаемых методами порошковой металлургии, весьма широк и непрерывно увеличивается. Среди явных представителей изделий порошковой металлургии можно отметить зубчатые колеса, рычаги, кулачки и поршни, применяемые в областях автомобилестроения, машиностроения, энергетики, средств связи, строительной, горнодобывающей и авиакосмической промышленности. Из ленты, полученной холодной прокаткой никелевого порошка, изготавливают монеты, например, канадский пятицентовый доллар. Порошок железа используется в качестве носителя для тонера в ксероксах. Алюминиевый порошок служит компонентом ячеистого бетона, красок и пигментов твердого ракетного топлива.

Без изучения и применения методов порошковой металлургии не появились бы способы обработки тугоплавких материалов и получения изделий из них. Благодаря технологиям порошковой металлургии стало возможным изготовление вольфрамовых коллиматоров для рентгеновской техники, снарядов с высокой скоростью и мощностью пробития из тяжелых сплавов вольфрама. Развитие порошковой металлургии оказало неизмеримый вклад в развитие всех отраслей промышленности.

Технологии, задействованные в порошковой металлургии, обеспечивают возможность изготовления специфических продуктов. Конструкционные порошковые материалы применяются для изготовления всевозможных деталей для приборов и машин с разноплановыми механизмами. Они обладают повышенной механической прочностью и высоким уровнем экономичности [6].

Использование порошковых материалов для выпуска фильтров обусловлено тем, что в процессе производства им можно задать улучшенные свойства по сравнению с иными пористыми материалами. В частности, для них характерна высокая очистительная способность при сохранении достаточной проницаемости, устойчивость к воздействию высоких температур, превосходная прочность, отличная теплопроводность, малоподверженность абразивному износу. Порошковой металлургией, могут быть получены фильтровальные изделия, имеющие изменяемую или регулируемую пористость, уровень проницаемости, а также степень очищения. Фильтры вместе с подшипниками пористой структуры входят в перечень основных видов пористых изделий, производимых методами порошковой металлургии [6].

Методами порошковой металлургии получают и триботехнические материалы, которые в свою очередь подразделяются на антифрикционные и фрикционные. Первые характеризуются наличием твердой матрицы, внутри которой находится мягкотелый наполнитель. Методы порошковой металлургии обеспечивают возможность получения антифрикционных изделий, имеющих низкий и стабильный коэффициент трения, отличающихся низким коэффициентом изнашивания, сопротивляющихся схватыванию. Такие изделия относятся к категории самосмазывающихся, поскольку смазывающий наполнитель еще на этапе производства был помещен в поры матрицы основного компонента. Антифрикционные материалы пригодны для производства разноплановых объемных элементов. Они также отлично справляются с функцией покрытий, нанесенных на подложки. Одним из наиболее ярких примеров продуктов,

изготовленных из материалов данного класса, являются подшипники скольжения.

Фрикционные материалы порошкового типа находят применение в узлах, служащих для передачи кинетической энергии. Для таких материалов характерна высокая износостойкость и отличные прочностные характеристики. Как правило, в состав подобных материалов включаются компоненты металлической и неметаллической природы. Первые придают готовым изделиям высокую теплопроводность, тогда как вторые необходимы для повышения коэффициента трения [6].

Широкое применение порошковая металлургия находит для получения инструментальных твердых поликарбидных сплавов, имеющих высокую красностойкость. Твердосплавные порошковые изделия имеют в своем составе тугоплавкие карбиды, соединенные с пластичными связующими металлической природы. Они изготавливаются за счет прессования порошковых смесей и жидкофазного запекания. Твердосплавные материалы, характеризующиеся высокими прочностными свойствами, твердостью и слабой изнашиваемостью, в своем составе, как правило имеют более 60% вольфрама. Эти материалы служат основой для производства инструментов, применяемых при резке металла, штамповке, воздействия давлением, бурения горных пород. Для улучшения свойства инструментов, изготовленных из данных материалов, нередко дополнительно на их поверхность наносят покрытия из тугоплавких соединений [6].

Категория электротехнических материалов порошкового типа подразделяется на несколько групп: контактные, электропроводящие, магнитные и прочие. Контактные материалы способны переносить до нескольких миллионов замыканий и размыканий электроцепей. Также существуют варианты контактов скользящего типа, которые задействуются при изготовлении электродвигателей, генераторов, потенциометров, токосъемников и прочих устройств.

Порошковые высокотемпературные материалы, состоящие из сплавов тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, циркония) активно применяются в авиационном строительстве, радиотехнике, электронике и других наукоемких отраслях. Порошковые материалы широко распространены и в атомной энергетической сфере, где они применяются для изготовления поглотителей с замедлителями и тепловыделяющих элементов.

Заключение

Начав свою историю развития много десятилетий назад порошковая металлургия приобрела поистине мировой масштаб, став основным технологическим процессом металлических товаров на продажу и, тем самым делая значительный вклад в развитие экономики особенно в развитых странах. Индустрия порошковой металлургии сегодня очень разнообразна и содержит широкий спектр предприятий, которые специализируются на одном или нескольких из многочисленных нишевых рынков в этом сегменте. С такой разнообразной и сильной историей, порошковая металлургия, несомненно, продолжит свой успех в течение еще многих десятилетий [15].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. Порошковая металлургия. М., «Металлургия», 1980. 496 с.
2. В.Н. Анциферов. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М., «Металлургия», 1987, 792 с.
3. Plotkin S.Y., Fridman G.L. History of powder metallurgy and its literature. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, vol. 13, 1974, p. 1026-1029.
4. <https://extxe.com/14744/poroshkovaja-metallurgija-2/> дата обращения 29.01.2020 г.

5. <https://atlaspressedmetals.com/history/> дата обращения 29.01.2020 г.
6. <https://metallplace.ru/about/stati-o-chnoy-metalurgii/poroshkovaya-metallurgiya/> дата обращения 29.01.2020 г.
7. Г.Н. Теплухин. Порошковые материалы. СЗПИ. 1984, 81 с.
8. <https://www.horizontechnology.biz/blog/history-of-powder-metallurgy-metal-powder-products/> дата обращения 30.01.2020 г.
9. А.Н. Кубанова, А.Н. Сергеев, Н.М., Добровольский, А.Е. Гвоздев, П.Н. Медведев, Д.В. Малий, Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 3, с. 452-476.
10. Д. Барк, В. Вейс. Порошковая металлургия материалов специального назначения. Пер. с англ. М., «Металлургия», 1977, 376 с. с ил.
11. А.Е. Гвоздев. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах: монография: 2-е изд., испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 476 с.
12. Г.А. Либерсон. Производство спеченных изделий. М., «Металлургия», 1982, 256 с.
13. F. Skaupy and V. S. Rakovskii, Metal Ceramics. Manufacture of Metal Articles from Powders. Изд. Металлург, 1983, 365 с.
14. Randall M. German. Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing, Metal Powder Industry. 2005, p. 528.
15. Leander F. Pease, William G. West. Fundamentals of powder metallurgy. Metal Powder Industry. 2002, p. 452.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiparisov S.S., Libenson G.A. 1980. Powder metallurgy. Metallurgy, Moscow.
2. Anziferov V.N. 1987. Powder metallurgy and sprayed coatings. Metallurgy, Moscow.
3. Plotkin S.Y., Fridman G.L. 1974, "History of powder metallurgy and its literature". Powder Metallurgy and Metal Ceramics, vol.13, p. 1026-1029. doi: 10.1007/BF00807917.
4. Modern technology of production (2020), Available at: <https://extxe.com/14744/poroshkovaya-metallurgiya-2/> (accessed 29 January 2020).
5. Atlas Pressed Metals (2020), Available at: <https://atlaspressedmetals.com/history/> (accessed 29 January 2020).
6. Metal place (2020), Available at: <https://metallplace.ru/about/stati-o-chnoy-metalurgii/poroshkovaya-metallurgiya/> (accessed 29 January 2020).
7. Tepluhin G.N. 1984. Powder's materials. SZPI, Leningrad.
8. Horizon Technology Inc. (2018), Available at: <https://www.horizontechnology.biz/blog/history-of-powder-metallurgy-metal-powder-products> (accessed 30 January 2020).

9. Kubanova A.N., Sergeev A.N., Dobrovolskii N.M., Gvozdev A.E., Medvedev P.N., Malii D.V. 2019, "Materials and technologies for production products by additive manufacturing", Chebyshevskii sbornik. vol. 20, no. 3 (71), pp. 452-476.
10. Bark D. & Veys V. 1977, Powder metallurgy of special-purpose materials. Metallurgy, Moscow.
11. Gvozdev A.E., 2019. Extreme effects of strength and plasticity in metal high alloy ingot and powder systems, Tula state University, Tula.
12. Libenson G.A., 1982, Production of sintered products, Metallurgy, Moscow.
13. Skaupy F. and Rakovskii V.S., 1983, Metal Ceramics. Manufacture of Metal Articles from Powders, ONTI-Metallurg, Moscow.
14. Randall M. German. 2005. Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing, Metal Powder Industry. England.
15. Leander F. Pease, William G. West. 2002. Fundamentals of powder metallurgy. Metal Powder Industry. England.