

## FROM EGYPTIAN PYRAMIDS TO SPACE

V. N. ANTSEFEROV

*The author presents the history and problems of powder metallurgy. Technological processes of metallic powder production, as well as the characteristics and spheres of application of powder metallurgy are examined.*

**В популярной форме автор знакомит с историей и проблемами порошковой металлургии. Рассмотрены технологические процессы, свойства и применение порошковых материалов.**

## ОТ ЕГИПЕТСКИХ ПИРАМИД ДО КОСМОСА

В. Н. АНЦИФЕРОВ

Пермский государственный технический университет

Человечество все больше проникается пониманием того, что его будущее определяется не только природными материалами Земли, но зависит от перестройки взаимоотношений между человеком и вновь создаваемыми материалами. Экономические последствия этой перестройки, вероятно, могут быть настолько глубокими, что окажут революционное влияние на развитие мировой цивилизации.

Исторически человек сначала нашел хозяйственное применение ряда природных материалов, таких, как камень, дерево, глина, растительные волокна и животные ткани. На следующей, более высокой стадии развития он научился использовать металлы и производить стекло. Однако только в последнее время, благодаря углубленным знаниям физических и биологических свойств различных веществ, а также достижениям в технологии материалов появилась возможность получать материалы с заданными свойствами, то есть такие, которые удовлетворяют конкретным требованиям развивающейся техники. Важную роль в развитии технологии создания материалов с заданными свойствами играет порошковая металлургия, которую человечество применяет с незапамятных времен.

В гробнице египетского фараона Тутанхамона, жившего в XIV веке до н.э., лежали кованные кинжалы, украшенные порошковым золотом, и амулет из железа. В Дели, возле мечети Кувват-уль-Ислам возвышается железная колонна высотой 7,3 метра и весом около 6,5 тонны, изготовленная примерно в 415 году н.э. Однако известно, что человечество до начала XIX века не знало способа получения температур, необходимых для плавки чистого железа и литья изделий из него. Как же тогда древние мастера смогли изготовить изделия и колонну из железа? Ученые установили, что железные изделия были изготовлены из частичек губчатого железа, полученного восстановлением богатой железной руды.

Итак, некоторые приемы порошковой технологии известны человечеству несколько тысячелетий! Тогда почему же порошковая металлургия не стала основным методом в производстве металлов и сплавов? Дело в том, что уже в V веке до н.э. древние греки научились плавить науглероженное железо и разливать его из печи в изложницы. Дальнейшее усовершенствование способа плавки науглероженного железа привело к созданию доменного процесса.

Развитие ремесел, сельского хозяйства, военного дела требовало все большего количества металла,

и доминирующее положение в его производстве заняли методы плавки и литья. Металла требовалось все больше и больше. Создавались все более совершенные способы его производства, хотя и не оптимальные. Вспомним ставший классическим двойной передел: руда—чугун, чугун—сталь (железо). А ведь не надо быть экономистом, чтобы понять, что двойные операции — это двойной расход энергии и вспомогательных материалов. Сейчас металлургия возвращается к прямому восстановлению, но “потеряны” столетия.

Обратимся вновь к порошковой металлургии. Ясно, что в возникшей ситуации она не была конкурентноспособна, и о ней забыли. Новое возрождение порошковой металлургии произошло в начале XIX века. Важнейшей научно-технической проблемой в то время было создание эффективной технологии переработки платины. Из-за высокой температуры плавления ( $1769^{\circ}\text{C}$ ) и отсутствия соответствующих плавильных устройств платину получали сложным и небезопасным путем — плавлением мышьяковистых сплавов платины с удалением мышьяка при прокаливании.

Открытие на Урале богатых месторождений платины послужило толчком к добыче “белого” металла. Разрешить задачу переработки платины было поручено лаборатории Департамента горных и соляных дел Горного кадетского корпуса и Главной горной аптеки, руководителем которой был назначен известный русский инженер и ученый Петр Григорьевич Соболевский. Обладая блестящими способностями, он успешно трудился над решением различных технических проблем. С 1816 года П.Г. Соболевский работал в Горном ведомстве: до 1824 года — на Уральских заводах, а с 1825-го — в Петербургском горном кадетском корпусе (переименованном впоследствии в Горный институт). Работами по получению и использованию платины, которые явились поворотным моментом в развитии химии и металлургии этого металла, он завоевал мировую известность.

Убедившись в несовершенстве метода сплавления платины с мышьяком, П.Г. Соболевский при участии металлурга В.В. Любарского предпринял попытку найти оптимальный способ изготовления металлических изделий из платины. Полностью отказавшись от выплавки, он подвергал химической обработке природные соединения платины. Полученную очищенную губчатую платину набивал в металлическую цилиндрическую форму и подвергал обработке давлением. Спрессованный материал нагревался и повторно обрабатывался давлением. В результате из губчатого металла получались плотные, компактные платиновые заготовки. Двадцать первого марта 1827 года П.Г. Соболевский доложил о своей работе на торжественном собрании ученого комитета по горной и соляной части, при этом демонстрировал чаши, проволоку, тигли, медали, по-

лученные новым методом. В том же году в “Горном журнале” он опубликовал работу “Об очищении и обработке сырой платины”.

Присутствовавший на демонстрации опытов П.Г. Соболевского профессор Н.П. Щеглов так описывал свои впечатления: “Недаром говорит пословица, что великие открытия оканчиваются большей частью великою простотою. Все почти европейские знаменитые химики в течение 70 лет старались найти простейший способ отделять чистую платину от сопровождающих ее обыкновенных в природе других минералов и приводить в ковкое и плотное состояние; но доселе усилия их были безуспешны... Слава и честь гг. Соболевскому и Любарскому; они нашли наконец такой способ, при котором кроме горна, винтового пресса и ничтожного количества углей ничего не нужно”. Описав подробно сам способ, Н.П. Щеглов добавляет: “Многие, может, скажут, что это слишком просто, но я опять говорю, что знаменитые химики Европы 70 лет искали простоты сей безуспешно”.

Открытие Соболевского положило начало новой отрасли техники — порошковой металлургии, методу, при помощи которого в наши дни изготовляют широчайший ассортимент порошковых и композиционных материалов. Однако дальнейшее развитие плавильных средств привело к повышению достигаемых температур, и метод порошковой технологии в очередной раз уступил место технологии плавки. В начале XX века в связи с развитием электротехники, машиностроения и других отраслей потребовались материалы, которые невозможно было изготовить обычными для того времени способами. Так, возникла необходимость производства металлической нити накала для электрических ламп, пришедших на смену лампам с угольной нитью. В качестве материала для нити выбрали вольфрам, имеющий температуру плавления около  $3400^{\circ}\text{C}$ . Многочисленные попытки получения нити вольфрама не давали результата, пока не была использована порошковая технология, заключающаяся в прессовании порошка вольфрама в прутки, термообработке (спекании) их при высокой температуре, ковке и в горячем состоянии вытягивании нити. Для получения нити нужны были фильеры из износостойкого материала. Таким материалом первоначально был дорогостоящий алмаз, который еще не умели получать искусственным путем. В качестве замены были предложены карбиды металлов. Вначале они имели повышенную хрупкость и не были пригодны для изготовления фильер. Проблему удалось решить, когда к карбидам в качестве цементирующей связки стали добавлять металлы, в частности к карбиду вольфрама — кобальт. В дальнейшем порошковая технология позволила решить проблему создания пористых самосмазывающихся подшипников, в которых остро нуждалась промышленность, и уже навсегда заняла свое место в современной науке и технике. В нашей стране ее

интенсивное развитие началось с организацией производства редких металлов. В 1918 году на заседании Горного совета рассматривали вопрос о добыче вольфрама и молибдена, а при Главхиме была организована Комиссия по редким металлам, превратившаяся в 1921 году в “Бюрэль” (Научно-техническое бюро по промышленному применению редких элементов). Исследования в этом бюро послужили основой создания в стране промышленного производства тугоплавких металлов, твердых сплавов и тугоплавких соединений редких металлов с применением методов порошковой технологии. В настоящее время имеются сотни научных организаций и специализированных производств, активно участвующих в развитии порошковой металлургии.

Современная сущность метода порошковой металлургии состоит в применении исходного сырья в виде порошков металлов и неметаллов, которые прессуются или формуются в изделия заданных размеров, а затем подвергаются термической обработке (спеканию) при температуре ниже точки плавления основного компонента. В условиях массового производства этот метод отличается высокой производительностью и экономичностью: он дает возможность получать изделия высокой размерной точности.

Метод позволяет сократить расход металла и повысить производительность труда в 1,5 – 2 раза. Если при изготовлении деталей машин и механизмов путем литья и последующей станочной обработки потери металла достигают 40 – 60% и более, то при использовании метода порошковой металлургии они не превышают 5 – 10%. Даже при изготовлении изделий сложной формы число технологических операций не превышает 3 – 5, при этом производство сосредоточено на одном предприятии. Изготовление тех же изделий из литых материалов требует большого количества производственных операций, значительных трудозатрат.

Основным сырьем для производства изделий методом порошковой металлургии являются порошки. Промышленность России производит широкую номенклатуру порошков железа, меди, сплавов меди, олова, никеля, вольфрама, молибдена, кобальта, нержавеющей стали, титана и других.

Типовая технология изготовления деталей из металлических порошков включает следующие операции: а) приготовление шихты, то есть смешивание порошков различных компонентов, содержание которых определяется составом материала; б) прессование – получение брикета требуемой формы и размера и придание ему прочности и плотности, достаточных для транспортировки его к следующей операции; в) спекание – термическая обработка спрессованных брикетов (прессовок) с целью придания им необходимой эксплуатационной прочности; г) калибрование – получение деталей высокой точности, с заданной чистотой поверхности; д) до-

полнительная обработка для повышения физико-механических свойств (химико-термическая пропитка, нанесение защитных покрытий и так далее).

Данный технологический процесс наиболее распространен в промышленности. Он может изменяться в зависимости от свойств исходных материалов и требуемых характеристик деталей. Так, для изготовления конструктивных деталей с высокими физико-механическими свойствами используются методы прессования и спекания, холодного или горячего деформирования предварительно спеченной заготовки. Для получения высокопористых проницаемых материалов могут применяться методы спекания свободно насыпанных порошков, для получения фрикционных изделий – метод спекания под давлением с одновременным припеканием спеченного элемента к стальной основе и так далее.

В течение последних лет значительный прогресс достигнут при получении и использовании полуфабрикатов, имеющих практически 100%-ную плотность за счет применения технологических процессов прокатки ленты из порошка,ковки пористых заготовок, горячего изостатического прессования, инжекционного прессования. Среди материалов, полученных по порошковой технологии, значительное место занимают пористые. В 1932 году в СССР были получены порошковые пористые антифрикционные материалы, обладающие низким коэффициентом трения. Он достигается в результате самосмазываемости, которая происходит за счет масла, выступающего в процессе трения из поровых каналов. Сегодня существует значительное количество порошковых антифрикционных материалов, которые применяются для изготовления деталей, работающих главным образом в условиях трения скольжения (подшипники, втулки, вкладыши). Основные требования, предъявляемые к технологии изготовления материалов для узлов трения: возможная простота технологического процесса, его доступность, использование недефицитного исходного сырья, вспомогательных материалов и оборудования, высокий уровень механизации и автоматизации. Широкое распространение в производстве получили пористые подшипники скольжения на основе железа и меди. При работе в особых условиях для узлов трения применяются вследствие их высокой износостойкости и хороших противозадирных свойств тугоплавкие металлы и соединения.

На основе карбида вольфрама изготавливают кольца, шарики и седла клапанов. Повышенной твердостью, прочностью, вязкостью, стойкостью к абразивному износу, термической стабильностью и инертностью к агрессивным средам обладает новый класс материалов на основе боридов титана, циркония и гафния, в которых содержится 70 – 87,5% боридов и 12,5 – 30% порошка металла этой группы.

Замкнутые циклы водоснабжения невозможны без применения надежных фильтровальных

устройств. В наши дни, когда проблемы экологии становятся жизненно необходимыми, создание надежных фильтров, позволяющих достигать высокой степени очистки различных агрессивных жидкостей, газов и других сред, необыкновенно важно. Фильтры, изготовленные методами порошковой металлургии из пористых материалов, обладают сочетанием таких качеств, которые делают их незаменимыми во многих отраслях техники и промышленного производства. Они применяются для очистки горючих и смазочных материалов, для фильтрования низкоплавких металлов, в химической промышленности для очистки газов, при нефтедобыче для очистки нефти. Эти фильтры значительно прочнее и надежнее керамических или изготовленных из органических материалов. Их можно использовать в разных температурных режимах; пористость таких фильтров более однородна, а проницаемость выше. Поэтому применение пористых фильтров гарантирует, по существу, стерильную очистку. Во многих случаях, например, в медицинской, фармацевтической промышленности только эти фильтры обеспечивают необходимую степень очистки лекарственных препаратов от ненужных или вредных включений, которые неизбежны в процессе создания препарата.

Широкое применение порошковых фильтров с целью газоочистки обусловлено тем, что они надежно работают в широком интервале температур. В аналогичных условиях фильтры из других материалов зачастую выходят из строя. В зависимости от материалов порошковые фильтры применяются для очистки газов при повышенном давлении. Высокая работоспособность спеченных фильтров в промышленных условиях намного упрощает схему пылеулавливания. Загрязнение атмосферного воздуха на предприятиях, использующих порошковые фильтры, намного меньше.

Применение порошковых фильтров во многих случаях изменяет и сам технологический процесс производства. Так, очистка прядильного раствора является важной и достаточно сложной технологической операцией производства искусственного волокна. Использование фильтров из коррозионно-стойкого порошка упрощает ее. Однако пористые материалы, изготовленные методами порошковой металлургии, служат не только в качестве фильтров. Они, в частности, применяются для охлаждения высокотемпературных камер газовых турбин. При этом используется метод пропускания через поры какого-либо охладителя. В этих условиях тепло рассеивается, пористый материал как бы "потеет". Если охладителем служат жидкости, то температура пористого материала будет снижаться вследствие испарения жидкости. Такой принцип охлаждения в настоящее время достаточно широко внедрен в магнитогидродинамических генераторах, ракетных двигателях для предотвращения аэродинамических нагревов летательных аппаратов. В качестве охла-

дающей жидкости для ракетных сопел служат различные расплавленные металлы, которыми пропитывают пористые вольфрамовые заготовки.

В авиации и космонавтике пористые материалы становятся все более незаменимыми. Их, например, используют в борьбе с обледенением самолетов: через пористые пластины из бронзового порошка или порошка нержавеющей стали, расположенные на кромках крыльев и хвостового оперения, подается теплый воздух или антифриз.

Среди пористых материалов в последнее время все большее внимание привлекают высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ), которые в зарубежной литературе называют пеноматериалами. Это новый тип пористых материалов на металлической и неметаллической основе, имеющих предельно высокую пористость и проницаемость сетчатоячеистой структуры порового пространства. ВПЯМ имеют хороший набор физико-химических и эксплуатационных характеристик: высокую пористость, газопроницаемость, термостойкость, пылеемкость, фильтрующую способность, коррозионную стойкость, низкое гидравлическое сопротивление, высокую для данного уровня пористости конструкционную прочность и жесткость. Они обладают широкими возможностями применения в различных областях техники: металлургии, авиа- и ракетостроении, приборостроении, машиностроении. Разработка и применение высокопористых ячеистых материалов позволяет создавать новые, совершенствовать имеющиеся системы очистки газов, жидкостей, глушителей шума, датчики системы давлений, огнепреградители, адсорбционные, акустические, отопительные, теплообменные устройства, элементы химических источников тока.

Еще большей пористостью, чем пеноматериалы, обладают так называемые аэрогели. Аэрогели изготавливают методом желатинизации с последующим высушиванием. Такие материалы почти на 99% состоят из воздуха. Их можно изготавливать из металлов или их окислов, однако для практического использования интерес представляют в первую очередь аэрогели из двуокиси кремния. Если к получающимся воздушным образованиям присмотреться более внимательно, то можно заметить, что их структура на разных уровнях повторяется. Аэрогели — это самоподобные, или фрактальные, образования. Следствием этой необычной структуры являются и необычные физические свойства. Обнаружено, что в аэрогелях из двуокиси кремния звуковые волны распространяются в 50 раз медленнее, чем в обычном стекле. Аэрогели пропускают свет, но очень плохо проводят тепло. Перспективным представляется производство оконных стекол с аэрогелевым слоем, которые позволяют сохранять в три раза больше тепла, чем самые лучшие оконные конструкции, применяемые в настоящее время. Кроме того, чуть матовые аэрогелевые окна



создают лучшее освещение помещений, так как сильнее рассеивают солнечный свет. Такие окна могут использоваться там, где не требуется большой прозрачности стекол, например, в строительстве куполов.

С развитием техники, в особенности авиационной, ракетной и космической, возникла необходимость в материалах, имеющих повышенную прочность при высоких температурах. Современные жаропрочные сплавы на железной, никелевой и кобальтовой основе, полученные традиционным методом плавки, содержат в своем составе до 25 легирующих и других элементов в виде примесей. Однако рабочая температура таких сплавов не превышает 1200°C. Этого недостаточно для дальнейшего развития новой техники, поэтому все чаще начинают обращаться к материалам на основе тугоплавких металлов и соединений, которые получают методом порошковой металлургии.

Среди тугоплавких металлов наибольший интерес представляют металлы так называемой большой четверки — тантал, ниобий, молибден, вольфрам. Температура плавления первых трех выше 2000°C, а вольфрама — выше 3000°C. Области применения тугоплавких металлов определяются их свойствами. Из всех металлов, встречающихся в природе, вольфрам имеет наибольшую температуру плавления и обладает высокой прочностью при повышенных температурах. Поэтому вольфрам и материалы на его основе идут на изготовление изделий, работающих при очень высоких температурах, например, в соплах реактивных двигателей, в деталях космических аппаратов. Широко применяется вольфрам в электроламповой, радиотехнической и электровакуумной промышленности. Из него готовят нити накаливания электрических ламп, катоды и сетки радиоламп и рентгеновских трубок, различные нагреватели и экраны высокотемпературных печей. Вольфрам используется и в качестве легирующего элемента для производства высококачественных сталей.

Держатели для вольфрамовой проволоки делают из другого тугоплавкого металла — молибдена. Из него же делают проволоку, ленты и фольгу для ртутных выпрямителей, сетки передаточных радиоламп, аноды, пружины для поддержки катодов в разрядных трубках и другие изделия. Тантал сочетает в себе высокую температуру плавления, хорошую пластичность, высокую теплопроводность, химическую инертность. Поэтому его используют в различных отраслях техники: для изготовления коррозионно-стойкого оборудования, в электровакуумной промышленности, в нагревательных устройствах, работающих в вакууме или атмосфере инертного газа. Тантал значительно пластичнее вольфрама, поэтому из него проще получать листы, проволоку и фасонные детали методом прокатки иликовки. Благодаря высокой устойчивости к действию боль-

шинства кислот и щелочных растворов тантал применяется при изготовлении химической аппаратуры, а также в костной хирургии и нейрохирургии.

Ниобий и его сплавы используются в термически напряженных узлах скоростных самолетов, ракет и космических аппаратов. Стойкость ниобия в расплавленных щелочных металлах позволяет монтировать детали из него в различных узлах ядерных реакторов. Химическая стойкость ниобия в агрессивных средах взята на вооружение химической промышленностью. Из него делают теплообменники, змеевики, трубопроводы.

К тугоплавким соединениям относятся и абразивные материалы — карбид кремния и карбид бора. Из них изготавливают шлифпорошок, абразивные круги на органических и неорганических связках, а также другие соединения, применяемые в последнее время для обработки различных сплавов. Доминирующее место занимают тугоплавкие соединения в металлообрабатывающей промышленности, где твердые сплавы произвели подлинную революцию. Стойкость инструмента, оснащенного твердыми сплавами, повышается в 15 — 100 раз, что обуславливает рост производительности труда в 3 — 5 раз. Основная тенденция современного развития в этой области — повышение работоспособности твердых сплавов, разработка безвольфрамовых сплавов, а также новых режущих сверхтвердых материалов. Это кубический нитрид бора, получаемый из гексагонального нитрида бора при сверхвысоких давлениях, и так называемый гексанит-Р. Для его производства используют взрывную технику и прессование под высоким давлением. Гексанит-Р состоит из дисперсных зерен кубического и гексагонального нитрида бора. Последний обладает повышенной ударной вязкостью и идет на обработку высокопрочных материалов.

Важнейшая область использования тугоплавких соединений, таких, как карбид кремния на силикатной и нитридной связках и самосвязанный карбид кремния, — производство огнеупорных изделий. Из огнеупорных материалов делают желобы нагревательных колодцев, футеровочные кирпичи для печей кипящего слоя обжига ртутных руд, направляющие опоры проходных нагревательных печей. Из самосвязанного карбида кремния изготавливают защитные чехлы термопар для непрерывного контроля температуры расплавов алюминия, меди и их сплавов, а также для агрессивных газов воздушонагревательных печей. Защитные чехлы в промышленных масштабах делают из диборида циркония и сплавов диборида циркония с молибденом и вольфрамом для непрерывного контроля температуры стали в мартеновских печах и синтетического чугуна в плавильных индукционных печах и миксерах.

Широкое применение в качестве высокотермостойких огнеупоров получили нитрид кремния и материалы на его основе. Они обеспечивают

длительную работу изделий в условиях циклического нагревания в расплавах цветных металлов, сплавов и газовых сред. Это стопорные дозирующие устройства литейных машин, направляющие втулки, электрододержатели сварочных полуавтоматов. Особое место занимают огнеупорные материалы, используемые для плавки и испарения металлов в вакууме с целью нанесения пленок из алюминия, хрома, никеля, меди и получения покрытий с высокой отражательной поверхностью. Такие покрытия необходимы для исследования космоса, применяются они и в пленочных конденсаторах, зеркалах, светильниках, киноэкранах; кроме того, они используются в металлических и пластмассовых изделиях с антикоррозионной поверхностью для судостроительной, автомобильной, авиационной промышленности и радиоэлектроники.

Для высокотемпературных вакуумных электропечей (до 2800°C) в последнее время разработаны нагреватели на основе карбида ниобия с использованием технологии горячего шликерного литья. Стойкость их в связи с низкой скоростью испарения карбида ниобия в вакууме на порядок выше, чем у нагревателей из вольфрама.

Тугоплавкие соединения играют большую роль в электро- и радиотехнике. Например, гексаборид лантана используется в качестве эффективного термодатчика для мощных устройств современной электроники. Разработаны и эффективно используются сложные карбиды, способные работать с высокой степенью надежности при стационарных нагрузках переменным и постоянным током, а также в импульсных режимах.

Из тугоплавких соединений изготавливают электроды МГД-генераторов открытого цикла, полупроводниковые поджигатели игнитронов, нерасходуемые электроды для контактной сварки на основе нитрида титана, регулирующие стержни атомных реакторов, подшипники скольжения для криогенной техники, лопатки турбин газотурбинного двигателя. Наконец, обширная область применения тугоплавких соединений — термодиффузионные покрытия на металлах: силицидные и карбидные, а также покрытия, наплавляемые на стальные поверхности для повышения износостойкости. Этот далеко не полный перечень областей использования тугоплавких соединений будет, несомненно, значительно расширен в ближайшем будущем.

По теме статьи можно рекомендовать следующую литературу обзорного характера:

1. В мире науки, 1986. № 12.
2. Бондарев Б.И., Фаткуллин О.Х. Прогрессивная технология получения изделий из никелевых сплавов. // Вестник Академии технологических наук Российской Федерации. 1991. № 3. С. 34 — 40.
3. Нагаев Э.Л. Малые металлические частицы // Успехи физических наук. 1992. Т. 162. № 9. С. 49 — 124.
4. Штейнберг А.С. Репортаж из мира сплавов. М: Наука. 1989. 256 с.

\* \* \*

Владимир Никитович Анциферов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой композиционных и порошковых материалов, покрытий Пермского государственного технического университета. Автор 15 монографий и более 400 научных статей.