

Обзорная статья

УДК 621.762.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-146-158

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

И.М. Иванов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведены методы изготовления металлопорошковых композиций, в том числе используемых в аддитивном производстве и при нанесении защитных покрытий. Показано, что в авиастроении и других отраслях с высокими требованиями, предъявляемыми к свойствам порошков, наиболее оптимальными являются технологии газовой, газотермической, центробежной или плазменной атомизации. При этом окончательный выбор наиболее подходящей технологии должен быть сделан исходя из компромисса между требуемым качеством частиц и производительностью процесса.

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошковая металлургия, металлопорошковые композиции, атомизация, металлические порошки, газовая атомизация, плазменная атомизация

Для цитирования: Иванов И.М. Технологии изготовления металлопорошковых композиций // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 146–158. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-146-158.

Review article

MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF METAL POWDER COMPOSITES

I.M. Ivanov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Methods for producing metal powder composites are presented, including those used in additive manufacturing and protective coatings. It is shown that in aircraft manufacturing and other industries with high demands on powder properties, gas, thermal, centrifugal, or plasma atomization technologies are the most suitable. At the same time, the final choice of the most suitable technology should be based on a compromise between the required particle quality and the productivity of the process.

Keywords: additive technologies, powder metallurgy, metal powder composites, atomization, metal powders, gas atomization, plasma atomization

For citation: Ivanov I.M. Manufacturing technologies of metal powder composites. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 146–158. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-146-158.

Введение

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений авиационной науки и техники в последнее время является порошковая металлургия, непрерывное развитие которой, в свою очередь, привело к созданию современного способа изготовления

деталей – аддитивного производства [1]. Применение технологий порошковой металлургии и аддитивного производства позволяет получать сложнопрофильные изделия с уникальными функциональными характеристиками [2–7]. Внедрение аддитивных технологий в авиа- и двигателестроение также способствует не только существенному уменьшению массы и стоимости изготовления, но и повышению топливной экономичности и надежности двигателей [8].

Помимо этого, для развития современного авиастроения предъявляются все более высокие требования к износостойкости и надежности деталей, работающих в условиях трения и повышенных нагрузок. В авиастроительной отрасли одним из наиболее распространенных видов износа (в частности, в деталях двигателей) является фреттинг-износ – процесс разрушения поверхности, происходящий на границе двух контактирующих компонентов при малоамплитудных колебательных движениях [9]. В качестве способа защиты от фреттинга широкое распространение получило нанесение порошковых защитных покрытий.

С учетом вышеперечисленного особую важность представляет сырье для аддитивного производства – металлопорошковые композиции (МПК), характеристики которых в значительной степени определяют качество конечного продукта (детали или покрытия) [10]. К характеристикам, которые необходимо контролировать при производстве МПК, обычно относят форму и размер частиц (гранулометрический состав), а также химический состав и технологические свойства (насыпную плотность и текучесть) [11]. Эти свойства в первую очередь зависят от выбранной технологии синтеза.

Существует множество технологий изготовления МПК, которые традиционно подразделяют на физические, механические и химические. Физические методы основаны на фазовых переходах исходного материала – например, на плавлении, испарении и конденсации. Механические методы представляют собой процессы, при которых исходный материал механически разрушается (дроблением или истиранием) без значительного изменения химического состава. Химические методы предполагают использование химических реакций (восстановления, осаждения или разложения), в ходе которых состав и структура исходного сырья существенно изменяются, что позволяет получать порошки с уникальными свойствами [12].

Цель данной работы – анализ научно-технической информации о современных методах получения МПК, в том числе используемых при нанесении защитных покрытий.

Методы получения металлопорошковых композиций

Самыми распространенными методами производства МПК являются многочисленные методы атомизации (распыления) – процесса, при котором осуществляется диспергирование расплавов металлов в струе газа, жидкости или плазмы.

1. Технологии атомизации

Атомизация – одна из наиболее эффективных и экономичных технологий изготовления МПК. На ее долю приходится около 60–70 % изготовления всех промышленных порошков. При этом порошки, полученные распылением расплавов, практически всегда имеют сферическую форму частиц.

Общий принцип методов атомизации заключается в фрагментации жидкого металла на мелкие капли с их последующим охлаждением и затвердеванием. Энергия, необходимая для процесса фрагментации расплава, может поступать из различных источников: высокоскоростные газовые струи, водяные струи, центробежные силы и плазменные струи. Соответственно, методы атомизации делятся по типу этих источников [12].

1.1. Газовая атомизация

Газовая атомизация – один из самых распространенных методов получения металлических порошков высокой чистоты и контролируемой морфологии. Принцип метода основан на фрагментации струи расплава металла потоком высокоскоростного инертного газа (обычно аргона или азота).

Процесс начинается с нагрева металла до состояния расплава в тигле или индукционной печи. Расплав подается через сопло в камеру распыления, где встречается с направленным потоком инертного газа под высоким давлением. Аэродинамические силы газа разрушают струю расплава на мелкие капли, которые при охлаждении затвердевают, формируя порошок. Интенсивность дробления и размер получаемых частиц контролируются давлением и расходом газа, скоростью подачи расплава, температурой металла и конструкцией сопла. Схема процесса газовой атомизации представлена на рис. 1.

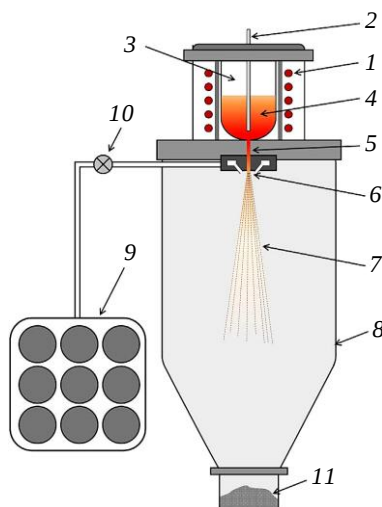


Рис. 1. Схематическое изображение системы газовой распыления: 1 – высокочастотная индукционная печь (в инертной атмосфере); 2 – стопор; 3 – тигель; 4 – расплав металла; 5 – сопло для расплавленного металла; 6 – сопло для газового распыления высокого давления; 7 – струя инертного газа; 8 – камера атомизации; 9 – баллон для подачи инертного газа; 10 – клапан регулирования давления инертного газа; 11 – порошок [13]

В результате процесса образуются порошки с частицами преимущественно сферической формы, с узким гранулометрическим распределением и высокой текучестью. С помощью газовой атомизации получают МПК преимущественно из сплавов на основе никеля и железа [10].

Основные преимущества метода – низкая стоимость получаемой продукции и высокая производительность процесса. К недостаткам относятся сложность получения мелкодисперсных порошков, а также порошков на основе тугоплавких металлов.

1.2. Газотермическая атомизация

Газотермическая атомизация по своей сути похожа на газовую атомизацию с той лишь разницей, что диспергирование металлического расплава происходит с помощью горячего газа, образующегося в результате сгорания топливно-кислородной смеси. В качестве топлива применяют ацетилен, пропан, водород и другие горючие газы. При этом газ выполняет не только механическую, но и термическую функцию – поддерживает металл в расплавленном состоянии.

Разрушение струи расплава происходит под действием аэродинамических сил газового потока, а также вследствие снижения вязкости металла при высоких температурах. Первичное дробление струи потоком сгорающей топливно-кислородной смеси приводит к образованию крупных капель, которые затем подвергаются вторичному дроблению и охлаждению в среде инертных газов. При этом скорость охлаждения значительно больше, чем при газовой атомизации, что позволяет получать более мелко-дисперсные порошки [12].

В целом газотермическая атомизация обеспечивает лучший контроль за размером и морфологией порошка. Обычно получаемые порошки имеют сферическую форму частиц, меньшую пористость и высокую текучесть. Преимуществами газотермического распыления также являются высокая энергонасыщенность процесса и возможность получения МПК трудноплавких материалов. К недостаткам метода относятся сложность и высокая стоимость оборудования, а также повышенные энергозатраты на разогрев газа. Кроме того, по сравнению с газовой атомизацией этот метод менее производительен и требует более тщательного контроля технологического процесса [14].

1.3. Распыление методом свободного падения

Метод свободного падения представляет собой один из наиболее простых способов получения металлических порошков. Сущность метода заключается в том, что расплавленный металл пропускают через отверстие в тигле или печи и он падает вертикально под действием силы тяжести на дно камеры или в среду, где происходит его дробление и затвердевание. Схема процесса представлена на рис. 2.

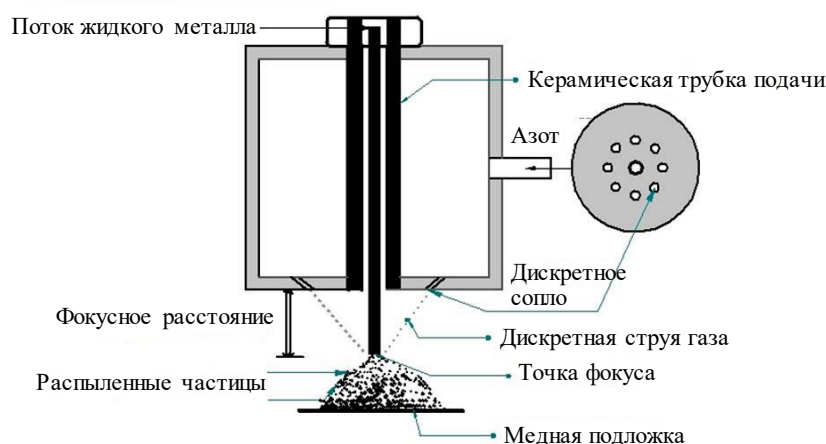


Рис. 2. Схематическое изображение распылителя свободного падения [15]

При падении расплава на поверхность охлаждения или в поток инертного газа капли распадаются на отдельные фрагменты, которые при контакте с холодной поверхностью затвердевают в виде порошка. Размер частиц в основном определяется диаметром сопла, высотой падения, вязкостью металла и скоростью охлаждения. Частицы, получаемые данным методом, имеют преимущественно неправильную, каплеобразную форму и широкий диапазон размеров [12].

Метод свободного падения отличается простотой аппаратуры и технологической реализации, однако его основные недостатки — низкая производительность, высокая дисперсия размеров частиц и ограниченная возможность контроля морфологии.

1.4. Водяная атомизация

Водяная атомизация — метод получения металлических порошков, основанный на дроблении струи расплава высокоскоростным потоком воды. В отличие от газовой

атомизации, где для разрушения струи применяются инертные газы, в данном случае используется жидкая среда, что существенно влияет на морфологию и структуру получаемого порошка.

Процесс начинается с расплавления металла в тигле или плавильной печи. Расплав подается через сопло в камеру распыления, где он подвергается воздействию струи воды под высоким давлением. Вода фрагментирует жидкую струю расплава на капли, которые затем охлаждаются и затвердевают, формируя порошок. Схематическое изображение процесса водяной атомизации приведено на рис. 3.



Рис. 3. Схематическое изображение процесса водяной атомизации [16]

Главная особенность водяной атомизации – высокая скорость охлаждения частиц. Это обусловлено высокой теплоемкостью и теплопроводностью воды, благодаря чему она быстро забирает тепло из расплава. В связи с высокой скоростью охлаждения порошки, получаемые водяной атомизацией, как правило, имеют неправильную, угловатую форму с широким гранулометрическим распределением. Они характеризуются высокой активностью поверхности и большей пористостью по сравнению с порошками, получаемыми газовой атомизацией [12].

К основным преимуществам метода относятся высокая производительность, относительная простота оборудования и экономичность. К недостаткам – более низкая чистота порошка (возможное попадание оксидов и загрязнений из воды), а также ограниченный контроль за формой и размером частиц. Таким образом, данный метод хорошо подходит для производства больших объемов МПК с невысокими требованиями к морфологии и чистоте.

1.5. Центробежное распыление

Центробежное распыление основано на диспергировании расплава под действием центробежных сил, возникающих при высокоскоростном вращении рабочего элемента (диска или тигля), на который подается расплав. Диспергирование расплава происходит без непосредственного воздействия потока рабочего газа или жидкости, что позволяет снизить уровень загрязнений и газонасыщения порошка.

Процесс центробежного распыления состоит в следующем: расплав металла подается на вращающийся диск, затем под действием центробежных сил расплав разлетается в виде тонкой пленки или струек, которые распадаются на капли и отбрасываются в рабочую камеру. В процессе полета капли охлаждаются и кристаллизуются в инертной газовой среде или вакууме, формируя частицы порошка. Схема процесса центробежного распыления представлена на рис. 4.

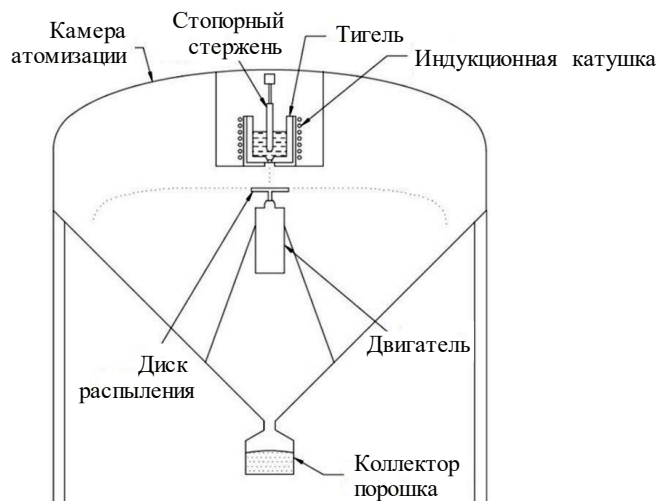


Рис. 4. Схематическое изображение процесса центробежного распыления [17]

Порошки, получаемые методом центробежного распыления, обладают преимущественно сферической формой частиц, плотной внутренней структурой и относительно узким гранулометрическим распределением. Отсутствие интенсивного контакта расплава с рабочей средой способствует снижению содержания кислорода и неметаллических включений. Высокие скорости охлаждения приводят к формированию мелкокристаллической или субмикроструктурной структуры частиц.

Преимуществами данного метода являются высокая чистота порошков, преобладающая сферичность частиц и возможность получения порошков из реакционноспособных и высокочистых сплавов, включая титановые и никелевые. К недостаткам метода относят сравнительно невысокую производительность, сложность оборудования и ограниченные возможности получения ультрадисперсных фракций [12, 17].

1.6. Плазменная атомизация

Плазменная атомизация относится к высокотехнологичным методам получения металлических порошков и основана на расплавлении исходного металлического материала в потоке высокотемпературной плазмы с последующим диспергированием расплава.

Процесс начинается с подачи металлической заготовки (как правило, в виде проволоки или прутка) в зону плазменной дуги, где происходит ее интенсивный нагрев и плавление. Под действием плазменного потока расплавленный металл распыляется на мелкие капли, которые в процессе полета охлаждаются и кристаллизуются в среде инертного газа. Высокая температура плазмы (до 10 000 K) обеспечивает возможность изготовления порошков из тугоплавких и реакционноспособных металлов и сплавов (в том числе никелевых и титановых). На рис. 5 изображена схема процесса плазменной атомизации.

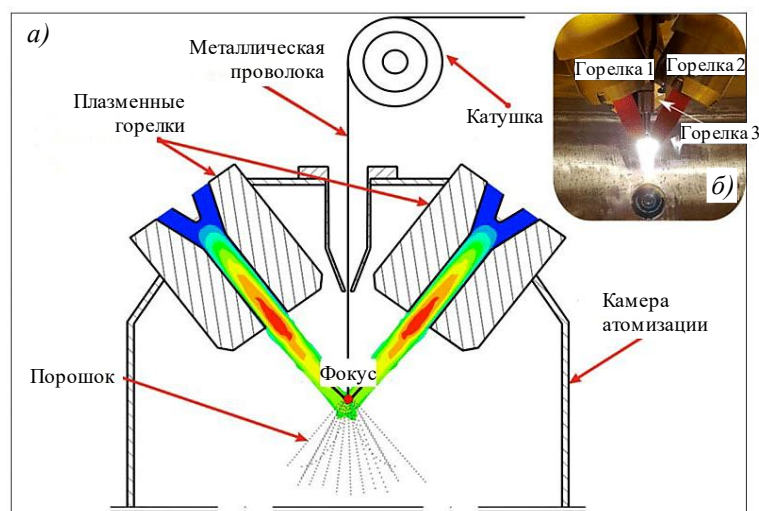


Рис. 5. Схематическое изображение процесса плазменной атомизации (а) и фотография трех аргоновых плазменных горелок (б) [18]

Порошки, получаемые методом плазменной атомизации, характеризуются высокой степенью сферичности, плотной внутренней структурой, минимальной пористостью и узким гранулометрическим распределением. Эти свойства делают порошки, полученные данным методом, особенно востребованными в аддитивных технологиях, в частности в процессах селективного лазерного и электронно-лучевого плавления [10, 14].

Недостатками этого метода являются высокая энергоемкость процесса, сложность оборудования, высокая стоимость получаемых порошков и относительно низкая производительность.

Следует также упомянуть технологию *плазменной сфероидизации*, которая представляет собой высокотемпературный процесс обработки металлопорошков. При этом исходный порошок оплавляется в потоке инертной плазмы, а затем быстро остывает, формируя сферические частицы с гладкой поверхностью. Таким образом, плазменная сфероидизация не является самостоятельным методом получения МПК, но позволяет улучшить свойства исходных порошков, полученных другими методами, превращая пористые или неправильной формы частицы в однородные сферические, пригодные для технологических процессов с высокими требованиями [10].

2. Механический размол

Механический размол – один из наиболее простых механических методов получения металлических порошков, основанный на разрушении твердого исходного материала под действием ударных, сдвиговых и истирающих нагрузок. В отличие от атомизации, когда формирование порошка происходит из расплава, в данном случае материал перерабатывается в твердой фазе, что позволяет получать порошки практически любых металлов и сплавов, включая тугоплавкие и интерметаллиды.

Процесс начинается с подачи заготовки или предварительно спрессованного куска металла в мельницу – шаровую, планетарную, вибрационную или атриторную. Частицы материала подвергаются интенсивным ударам, истиранию и пластической деформации, в результате чего происходит их разрушение до размеров порошка. При необходимости на этом этапе могут вводиться упрочняющие или дисперсные добавки, что позволяет получать композитные порошки с однородным распределением фаз.

В результате механического размола формируются порошки с неправильной, часто пластинчатой или угловатой формой частиц и широким гранулометрическим

распределением. Частицы характеризуются высокой плотностью дефектов кристаллической решетки, что повышает их реакционную способность и активность при последующих операциях спекания. Поскольку материал не подвергается плавлению, сохраняются исходные фазовые структуры и химический состав, что важно для тугоплавких и реакционноспособных сплавов [12].

К преимуществам механического размола относятся универсальность метода, возможность переработки широкого спектра материалов, а также относительно невысокая стоимость оборудования и простота технологии. К недостаткам – неправильная форма частиц, высокая вероятность загрязнения порошков материалом мельничных тел, образование микротрещин и необходимость дополнительного просеивания для получения частиц заданной фракции.

3. Восстановление из оксидов

Метод восстановления соединений (в частности, оксидов) является, вероятно, старейшим методом получения металлических порошков. При твердофазном восстановлении отобранная руда измельчается, смешивается с восстановителем (наиболее часто используют углерод или водород) и пропускается через проходную печь. Происходит реакция, восстанавливающая углерод и кислород из порошка, в результате чего образуется осадок в виде пористого губчатого металла, который затем измельчается, отделяется от всех неметаллических материалов и просеивается для получения порошка. Получаемые частицы, как правило, имеют неправильную форму и развитую поверхность (губчатая форма), что благоприятно сказывается на возможности их спекания [12].

К преимуществам данного подхода относятся относительная экономичность и возможность получения порошков с низким содержанием примесей. Другим несомненным преимуществом этого процесса является возможность его применения на бедных необходимым металлом рудах [19]. Недостатками можно считать ограниченный контроль за морфологией частиц и необходимость дополнительной механической обработки.

4. Электроосаждение

Металлические порошки также могут быть получены электроосаждением из водных растворов и расплавов солей. Метод основан на процессах электролиза, при которых ионы металла, содержащиеся в растворе электролита, восстанавливаются на катоде с образованием твердого осадка, который затем снимается, промывается и высушивается. Порошки, полученные методом электроосаждения, отличаются высокой химической чистотой. Форма частиц может варьироваться в зависимости от состава электролита, плотности тока и температуры процесса. Так, при низкой плотности тока формируются плотные и гладкие покрытия, в то время как при высоких значениях наблюдается образование разветвленных дендритных структур.

Этот процесс обладает такими преимуществами, как высокая чистота полученных порошков и относительная простота оборудования, а недостатками можно считать сравнительно низкую производительность, сложность управления процессом и высокую чувствительность к параметрам электролита [12].

5. Карбонильный метод

Карбонильный метод основан на способности некоторых металлов образовывать летучие карбонильные соединения при взаимодействии с оксидом углерода. Наибольшее промышленное значение данный метод получил при производстве порошков никеля, железа и кобальта.

Сущность карбонильного процесса заключается в образовании летучего карбонила металла при относительно низких температурах и последующем его термическом разложении с выделением металлического порошка. Типичным примером является процесс получения никелевого порошка, в котором металлический никель реагирует

с оксидом углерода с образованием тетракарбонила никеля $\text{Ni}(\text{CO})_4$ при температурах порядка 50–80 °С и повышенном давлении. Образовавшийся карбонил переносится в зону разложения, где при более высоких температурах (180–250 °С) происходит его диссоциация с выделением порошка никеля и регенерацией оксида углерода.

В результате термического разложения карбониллов формируются порошки с высокой химической чистотой и узким гранулометрическим распределением. Частицы, как правило, имеют сферическую форму и плотную внутреннюю структуру. Размер частиц может эффективно регулироваться изменением температуры разложения, давления и продолжительности пребывания карбонильного газа в зоне реакции [12].

К основным преимуществам карбонильных процессов относятся высокая чистота получаемых порошков, возможность точного управления морфологией и размером частиц, а также высокая реакционная способность получаемых порошков. Вместе с тем существенными недостатками метода являются сложность и высокая стоимость оборудования, высокая токсичность карбонильных соединений и повышенные требования к безопасности производства.

Результаты и обсуждение

Анализ научно-технической информации показал, что существует множество методов изготовления МПК, каждый из которых позволяет получать частицы со специфическими свойствами. Далее приведена сводная таблица рассмотренных методов изготовления металлических порошков с указанием их основных особенностей.

Основные особенности методов изготовления металлических порошков [10, 12–20]

Метод получения	Диапазон размеров частиц, мкм	Морфология частиц	Химическая чистота	Производительность	Насыпная плотность, г/см ³	Текучесть, с (воронка Холла)	Основные области применения
Газовая атомизация	10–200	Сферическая форма частиц с гладкой поверхностью	Высокая ($\geq 99,5\%$)	Средняя	3–4,5	15–25	Аддитивное производство, газотермическое напыление сплавов на основе Ni, Fe, Co
Газотермическая атомизация	5–150	Сферическая форма частиц с низкой пористостью	Очень высокая ($\geq 99,9\%$)	Низкая/средняя	3–4,2	12–25	Сплавы на основе Ti, Ni, Mo и тугоплавких металлов
Распыление методом свободного падения	>300	Каплеобразная форма частиц	Низкая ($\geq 95\text{--}98\%$ из-за окисления и примесей)	Низкая	1,5–3	40–80	Лабораторные исследования
Водяная атомизация	20–300	Неправильная (угловатая) форма частиц с высокой пористостью	Низкая/средняя ($\geq 96\text{--}99\%$)	Высокая	2–3	30–50	Порошковая металлургия массового производства
Центробежное распыление	50–250	Сферическая форма частиц	Очень высокая ($\geq 99,9\%$)	Низкая	3–4	10–20	Сплавы на основе Ni и Ti в авиакосмической промышленности (турбины и другие ответственные детали)

Окончание таблицы

Метод получения	Диапазон размеров частиц, мкм	Морфология частиц	Химическая чистота	Производительность	Насыпная плотность, г/см ³	Текучесть, с (воронка Холла)	Основные области применения
Плазменная атомизация	5–100	Сферическая форма частиц с гладкой поверхностью и низкой пористостью	Очень высокая ($\geq 99,99\%$)	Низкая	3–4,5	10–20	Сплавы на основе тугоплавких и активных металлов (Ti, Nb, Ta, Zr), высокочистые порошки для аддитивного производства
Механический размол	50–500	Неправильная (угловатая или пластинчатая) форма частиц с большим количеством дефектов	Низкая/средняя ($\geq 95–99\%$)	Средняя	2–4	50–120	Подготовка шихты, спекание, смешивание компонентов и механическое легирование
Восстановление из оксидов	1–50	Губчатая форма частиц	Высокая ($\geq 99\%$)	Средняя	1,5–2,5	50–100	Магнитные материалы: порошки на основе Fe, W, Mo, а также редкоземельных металлов с развитой поверхностью
Электроосаждение	5–100	Дендритная или зернистая форма частиц	Очень высокая ($\geq 99,99\%$)	Низкая	2–3,5	40–70	Электротехника, электроника, катализ, порошки на основе Cu, Ni, Ag
Карбонильный метод	<10	Сферическая форма частиц, частицы очень однородны по размеру и структуре	Очень высокая ($\geq 99,99\%$)	Низкая	2–3	15–25	Электротехника, электроника, катализ, порошки на основе Fe, Ni, Co высокой чистоты

Видно, что выбор технологии изготовления МПК определяется компромиссом между требуемым качеством частиц и производительностью процесса. Так, современные методы атомизации (газовая, плазменная и газотермическая, а также центробежное распыление) позволяют получать сферические, химически чистые порошки с высокими технологическими свойствами, благодаря чему применение данных методов является оптимальным в аддитивном производстве ответственных деталей (например, в авиа- и двигателестроении), несмотря на сравнительно низкую производительность этих процессов. В то же время такие методы как водяная атомизация или механический размол обеспечивают высокую производительность, но формируют частицы с неправильной формой, более низкой текучестью и чистотой, что делает их применение целесообразным

в массовом производстве порошков для прессования и спекания. Карбонильный метод и электроосаждение выделяются способностью получать мелкие высокочистые порошки для специальных и магнитных материалов.

Заключения

Таким образом, выбор наиболее подходящей технологии изготовления МПК зависит от требований к морфологии, химической чистоте, текучести частиц и масштабам производства. Показано, что в авиастроении и других отраслях с высокими требованиями, предъявляемыми к свойствам порошков, наиболее оптимальными являются технологии газовой, газотермической, центробежной или плазменной атомизации.

Список источников

1. Князев А.Е., Неруш С.В., Алишин М.И., Куко И.С. Исследования технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов ВТ6 и ВТ20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). С. 46–55 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.
2. Алишин М.И., Князев А.Е. Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). С. 37–45 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-5-5.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. Next-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts in FGUP VIAM: I. Synthesis materials and technologies // Russian Metallurgy (Metally). 2022. Vol. 2022. No. 6. P. 611–618. DOI: 10.1134/S003602952206009X.
4. Неруш С.В., Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Тарасов С.А. Разработка технологии пайки деталей, полученных аддитивными технологиями, из металлопорошковой композиции на основе кобальта // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). С. 18–29. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
5. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). С. 19–34. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
6. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ и $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 108–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
7. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В. и др. Износостойкие детонационные покрытия на основе карбида вольфрама для авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 92–109. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
8. Маггеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Васильев Б.Е., Кинзбургский В.С. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей // Технология легких сплавов. 2015. № 4. С. 7–13.
9. Liu C.S., Liu D.X., Zhang X.H. et al. Fretting fatigue characteristics of Ti-6Al-4V alloy with a gradient nanostructured surface layer induced by ultrasonic surface rolling process // International Journal of Fatigue. 2019. No. 125. P. 249–260. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.042.
10. Басков Ф.А., Логачева А.И., Логачев И.А., Тимофеев А.Н. О проблемах применения металлопорошковых композиций в технологии селективного лазерного сплавления // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2025. № 19 (4). С. 91–99. URL: <https://powder.misis.ru/jour/article/view/1020> (дата обращения: 23.02.2026). DOI: 10.17073/1997-308X-2025-4-91-99.

11. ГОСТ Р 59035–2020. Аддитивные технологии. Металлопорошковые композиции. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.
12. Panchal H., Bhaliya D., Patel M. Powder Manufacturing Techniques: A Review // *International Journal of Research and Review*. 2023. Vol. 10. No. 10. P. 152–160. DOI: 10.52403/ijrr.20231020.
13. Tamura R., Osada T., Minagawa K. et al. Machine learning-driven optimization in powder manufacturing of Ni–Co based alloy // *Materials and Design*. 2020. Vol. 198. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109290.
14. Kassym K., Perveen A. Atomization processes of metal powders for 3D printing // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26. Part 2. P. 1727–1733. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.364.
15. Goudar D., Srivastava V.C., Rudrakshi G. Effect of atomization parameters on size and morphology of Al-17Si alloy powder produced by free fall atomizer // *Engineering Journal*. 2017. Vol. 21. P. 155–168. DOI: 10.4186/ej.2017.21.1.155.
16. Lavernia E.J., Ma K., Schoenung J.M. et al. Metallic powders for additive manufacturing: science and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2024. 608 p.
17. Cegarra S.A., Pijuan J., Riera M.D. Cooling rate modeling and evaluation during centrifugal atomization process // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. Vol. 7. No. 3: Art. 112. DOI: 10.3390/jmmp7030112.
18. Yurtkuran E., Ünal R. Numerical and experimental investigation on the effects of a nozzle attachment to plasma torches for plasma atomization // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2020. Vol. 40. DOI: 10.1007/s11090-020-10095-x.
19. Thummler F., Oberacker R. Introduction to Powder Metallurgy. Leeds, GB: Maney Publishing, 1993. 346 p.
20. German R. Powder metallurgy and particulate materials processings: the processes, materials, products, properties and applications. Princeton, USA: Metal powder industries federation, 2005. 528 p.

References

1. Knyazev A.E., Nerush S.V., Alishin M.I., Kuko I.S. Researches of the technological properties of metal-powder compositions of Ti-4-6 and VT20 titanium alloys obtained by induction melting and gas atomization. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), pp. 46–55. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 23, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.
2. Alishin M.I., Knyazev A.E. Production of metal-powder high-purity titanium alloy compositions by induction gas atomization for application in additive manufacturing. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), pp. 37–45. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 23, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-5-5.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. Next-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts in FGUP VIAM: I. Synthesis materials and technologies. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2022, vol. 2022, no. 6, pp. 611–618. DOI: 10.1134/S003602952206009X.
4. Nerush S.V., Sviridov A.V., Afansiev-Khodykin A.N., Galushka I.A., Tarasov S.A. Development of brazing technology for parts obtained by additive technologies from cobalt based metal powder composition. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 18–29. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 23, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
5. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr in additive manufacturing (review) *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), pp. 19–34. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 23, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
6. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system Gd₂O₃–ZrO₂–HfO₂ and Sm₂O₃–Y₂O₃–HfO₂. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 108–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.

7. Batraev I.S., Rybin D.K., Ivanyuk K.V., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A. Wear resistant detonation coatings based on tungsten carbide for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 92–109. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
8. Magerramova L.A., Nozhnitsky Yu.A., Vasiliev B.E., Kinzbursky V.S. Application of additive technologies for the manufacture of parts of advanced gas turbine engines. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, no. 4, pp. 7–13.
9. Liu C.S., Liu D.X., Zhang X.H. et al. Fretting fatigue characteristics of Ti-6Al-4V alloy with a gradient nanostructured surface layer induced by ultrasonic surface rolling process. *International Journal of Fatigue*, 2019, no. 125, pp. 249–260. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.042.
10. Baskov F.A., Logacheva A.I., Logachev I.A., Timofeev A.N. On the problems of using metal-powder compositions in selective laser melting technology. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nyye pokrytiya*, 2025, no. 19 (4), pp. 91–99. Available at: <https://powder.misis.ru/jour/article/view/1020> (date of access: February 23, 2026). DOI: 10.17073/1997-308X-2025-4-91-99.
11. State Standard R 59035–2020. *Additive manufacturing. Metal powder composites. General requirements*. Moscow: Standartinform, 2020, 12 p.
12. Panchal H., Bhaliya D., Patel M. Powder Manufacturing Techniques: A Review. *International Journal of Research and Review*, 2023, vol. 10, no. 10, pp. 152–160. DOI: 10.52403/ijrr.20231020.
13. Tamura R., Osada T., Minagawa K. et al. Machine learning-driven optimization in powder manufacturing of Ni–Co based alloy. *Materials and Design*, 2020, vol. 198, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109290.
14. Kassym K., Perveen A. Atomization processes of metal powders for 3D printing. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, part 2, pp. 1727–1733. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.364.
15. Goudar D., Srivastava V.C., Rudrakshi G. Effect of atomization parameters on size and morphology of Al-17Si alloy powder produced by free fall atomizer. *Engineering Journal*, 2017, vol. 21, pp. 155–168. DOI: 10.4186/ej.2017.21.1.155.
16. Lavernia E.J., Ma K., Schoenung J.M. et al. *Metallic powders for additive manufacturing: science and applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2024, 608 p.
17. Cegarra S.A., Pijuan J., Riera M.D. Cooling rate modeling and evaluation during centrifugal atomization process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7, no. 3, art. 112. DOI: 10.3390/jmmp7030112.
18. Yurtkuran E., Ünal R. Numerical and experimental investigation on the effects of a nozzle attachment to plasma torches for plasma atomization. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2020, vol. 40. DOI: 10.1007/s11090-020-10095-x.
19. Thummler F., Oberacker R. *Introduction to Powder Metallurgy*. Leeds, GB: Maney Publishing, 1993, 346 p.
20. German R. *Powder metallurgy and particulate materials processings: the processes, materials, products, properties and applications*. Princeton, USA: Metal powder industries federation, 2005, 528 p.

Информация об авторах

Иванов Иван Максимович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan M. Ivanov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.05.2026.
The article was submitted 17.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 15.05.2026.