



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий

Борис Гузанов^{1, a}, Наталия Пугачева^{2, b}, Евгений Слукин^{3, c}, Татьяна Быкова^{2, d, *}

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет, ул. Машиностроителей, 11, г. Екатеринбург, 620012, Россия

² Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-5698-0018>, guzanov_bn@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>, nat@imach.uran.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4807-5135>, slukin@cniim-ekt.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>, tatiana_8801@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.74:543.4

История статьи:

Поступила: 29 октября 2020

Рецензирование: 18 ноября 2020

Принята к печати: 14 декабря 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Покрытия
 Плазменное напыление
 Порошок
 Фракция
 Связующее
 Растворитель
 Конгломерат

Финансирование:

Работа выполнена при частичном финансировании по теме № АААА-А18-118020790145-0 Министерства образования и науки Российской Федерации.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для деталей газотурбинных установок, эксплуатируемых в условиях коррозионно-эрозионного воздействия и интенсивного изнашивания, наиболее приемлемыми считаются композиции, содержащие в своем составе Ni, Co, Cr, Al, V, Y как в чистом виде, так и в составе соединений, наносимых на контактную поверхность при газотермическом напылении. Перспективными являются современные интегрированные комплексы, полученные объединением разнородных веществ в виде единой композиции. Такие порошки получают либо за счет плакирования, либо при конгломерировании тонкодисперсных исходных компонентов в более крупную частицу. Проблема разработки и изготовления установок для конгломерирования порошков является актуальной и практически важной, поскольку позволяет получать материал для газотермического напыления покрытий высокотемпературного назначения. **Цель работы** – разработать технологическую схему получения порошков требуемого химического состава с заданной формой и размером частиц, предназначенных для напыления высокотемпературных защитных покрытий. **Материалы и методы исследования.** Разработана технология получения интегрированных порошков для напыления покрытий с использованием метода распылительной сушки и последующего спекания в вакууме или в аргоно-водородной газовой среде, которая позволяет избежать потери исходного сырья за счет возврата мелкой и крупной фракции. Предложена технология подготовки материалов для распылительной сушки и гранулирования. Сконструирован и изготовлен аэродинамический классификатор гравитационного типа, позволяющий в автоматическом режиме осуществлять отбор необходимой для напыления покрытия фракции порошка, а также возврат нежелательной фракции на повторную переработку. Морфологию гранулированного порошка определяли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN. Химический состав получаемых интегрированных комплексов определен методом микрорентгеноспектрального анализа на приставке OXFORD. **Результаты и обсуждения.** Установлены технологические условия получения порошков заданного размера (40...100 мкм). Показано, что форма частиц конгломерата после распылительной сушки близка к сферической. На основе многофакторного эксперимента выполнена оптимизация технологического процесса получения порошка Ni-17Cr-10Al-1Y и Ni-22Cr-16Al-1Y размерами до 100 мкм. Показано, что при конгломерировании порошков с повышенным содержанием алюминия (Ni-22Cr-16Al-1Y) необходимо учитывать экзотермическую реакцию образования алюминидов никеля и разбавлять смесь исходных компонентов перед спеканием готовым спеченным порошком. Получаемые интегрированные комплексы характеризуются высокой жаростойкостью, поэтому предназначены и успешно используются для плазменного напыления защитных покрытий высокотемпературного назначения. **Выводы.** Разработана технология получения композиционных конгломерированных порошков Ni-17Cr-10Al-1Y и Ni-22Cr-16Al-1Y размерами частиц до 100 мкм и формой, близкой сферической. Отличительной особенностью этой технологии является то, что она позволяет избежать потери исходного сырья за счет возврата мелкой и крупной фракций.

Для цитирования: Технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий / Б.Н. Гузанов, Н.Б. Пугачева, Е.Ю. Слукин, Т.М. Быкова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 6–20. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-6-20.

*Адрес для переписки

Быкова Татьяна Михайловна, к.т.н., научный сотрудник
 Институт машиноведения УрО РАН,
 ул. Комсомольская, 34,
 620049, г. Екатеринбург, Россия
 Тел.: 8 (343) 362-30-43, e-mail: tatiana_8801@mail.ru

Введение

В современном газотурбостроении для защиты деталей, эксплуатируемых в условиях коррозионно-эрозионного воздействия и интенсивного изнашивания, наиболее эффективными считаются напыляемые покрытия системы Ni-Co-Cr-Al-B-Y [1–8]. Использование в качестве способа нанесения высокотемпературных защитных покрытий плазменного напыления позволяет проводить локальное или дополнительное упрочнение и защиту отдельных участков поверхности деталей с целью придания им особых служебных свойств. Определенные технологические трудности возникают при напылении разнородных металлических порошков, имеющих существенно отличающиеся температуры плавления и теплофизические свойства. Формирующиеся покрытия характеризуются повышенной пористостью, неоднородностью по химическому составу, склонностью к трещинообразованию и плохой адгезии к поверхности детали. Решить проблему различий теплофизических свойств позволяет применение так называемых интегрированных комплексов, представляющих собой объединение разнородных веществ в виде единой композиции в каждой частице порошка. Это стало возможным за счет создания либо плакированных порошков путем получения на исходной матричной частице одного или нескольких слоев других материалов, либо за счет получения порошковых материалов путем конгломерации (конгломерирования) тонкодисперсных исходных компонентов в более крупную частицу [11, 12]. При получении интегральных композиций особо важным является максимальный размер частиц, их форма, стабильность гранулометрического и химического состава, поэтому многие исследователи уделяют особое внимание определению этих характеристик. Систематические многолетние исследования позволили определить, что для этих целей наиболее приемлемыми являются составы, кристаллизующиеся с образованием эвтектических структур на основе никеля и/или кобальта, в которых за счет изменения содержания и концентрации легирующих элементов высокие показатели защитных свойств сочетаются с удовлетворительной пластичностью [13,14]. Выполненные ранее исследования, в том числе проведенные натурные

испытания, показали, что наилучшие результаты были получены в случае применения разработанной интегральной композиции состава Ni-22Cr-16Al-1Y [15–17].

Накопленный опыт показывает, что для плазменного напыления высокотемпературных покрытий размер частиц интегральных комплексов должен соответствовать интервалу 20...80 мкм. Немаловажным моментом является способность порошков не создавать заторы в транспортных трубопроводах, равномерная подача их в плазменную струю и свободное перемещение с газовым потоком. Этого удастся добиться при сферической или близкой ей форме частиц [6, 11, 12]. Положительно зарекомендовал себя метод распылительной сушки, используемый для интенсификации процессов сушки и гранулирования материалов [19–21]. В зарубежной практике применяются различные варианты данного метода в целях получения порошков для плазменного напыления, например: Al_2O_3 -Mo, WC-Co [22–25].

Цель работы – разработать технологическую схему получения порошков требуемого химического состава с заданной формой и размером частиц, предназначенного для напыления покрытий.

Методика исследований

Авторами предложена принципиально новая технологическая схема получения композиционных порошков для напыления покрытий, включающая в себя несколько последовательных операций (рис. 1).

Для распыления суспензий сконструирована и изготовлена установка, схема которой показана на рис. 2. Корпус камеры 1 установки имеет следующие размеры: диаметр 850 мм, высота 3000 мм. Такие размеры камеры обеспечивают полное высыхание порошка и предотвращают его прилипание к стенкам. Это дает возможность получать мелкие порошки по форме, близкой к сферической. Наличие верхнего 2 и нижнего 3 ввода распылителя 4 в камере позволяет вести процесс распыления суспензий в двух вариантах: «сверху-вниз» и «снизу-вверх». По второму варианту время высыхания капли в потоке воздуха существенно выше. Однако при этом происходит значительная турбулизация воздушно-



Рис. 1. Технологическая схема получения композиционных порошков

Fig. 1. Technological scheme for obtaining composite powders

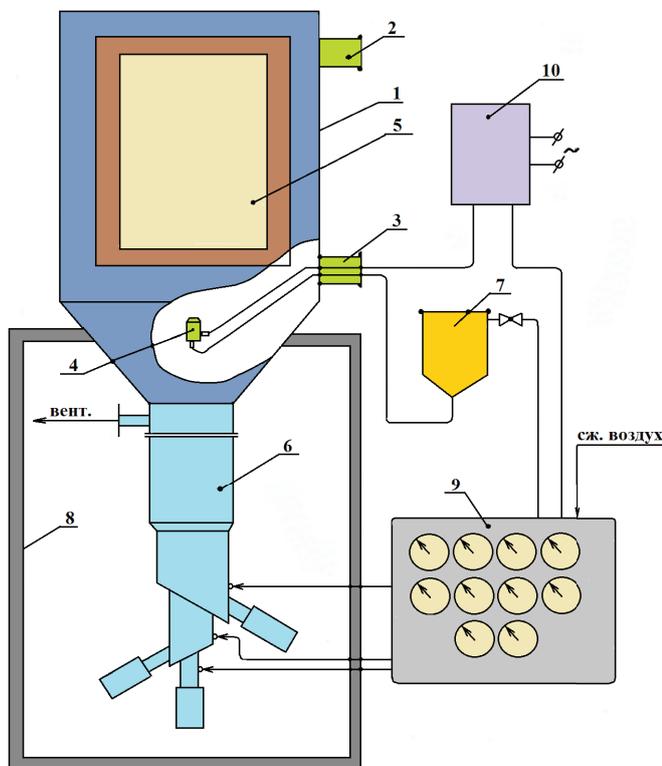


Рис. 2. Схема установка распылительной сушилки для конгломерирования порошков

Fig. 2. Schematic diagram of a spray dryer for powder agglomeration

капельного потока, способствующая повышению вероятности взаимодействия жидких капель со стенками установки и увеличению количества деформированных и разрушенных гранул.

Расход суспензии задается величиной давления воздуха в питателе и диаметром выходного отверстия форсунки 1,3...1,2 мм. Аналогично задается расход распыляющего воздуха. Производительность установки и гранулометрический состав порошка во многом определяются режимом распыления, а именно при данных размерах форсунки давлением распыляющего и подающего суспензию из питателя воздуха, а также его температурой.

Камера оборудована дверцей со смотровым стеклом 5 и классификатором 6. Она установлена на подставке 8 и комплектуется питателем для суспензий 7, распределительным пультом 9 и нагревателем распыляющего воздуха 10.

Традиционно для определения гранулометрического состава порошка используют набор сит с разным размером ячеек. С целью автоматизации процесса просеивания порошка был сконструирован и изготовлен аэродинамический классификатор гравитационного типа (рис. 3), представляющий собой систему аксиально расположенных труб. Расход воздуха и размеры труб подобраны таким образом, чтобы происходила двойная классификация порошка на три фракции. В зависимости от того, какую фракцию необходимо использовать в дальнейшем процессе приготовления порошка, остальные части направляются в голову процесса, что обеспечивает почти 100 % использования порошка в процессе распылительной суши.

Большую роль в процессе распыления играет выбор типа распылительной форсунки (рис. 4). Аналогом форсунки, применяемой нами, послужила форсунка, используемая для подачи диспергированного мазута в камеру сгорания печей [22]. Такая форсунка позволяет получать крупность распыляемых частиц мазута в интервале 0...100 мкм. Поскольку вязкость мазута и используемых нами суспензий приблизительно одинакова, то это дало возможность применить для наших целей данную конструкцию форсунки. Общая производительность установки для конгломерирования порошков по высушенному материалу составляет 20...50 кг/ч.

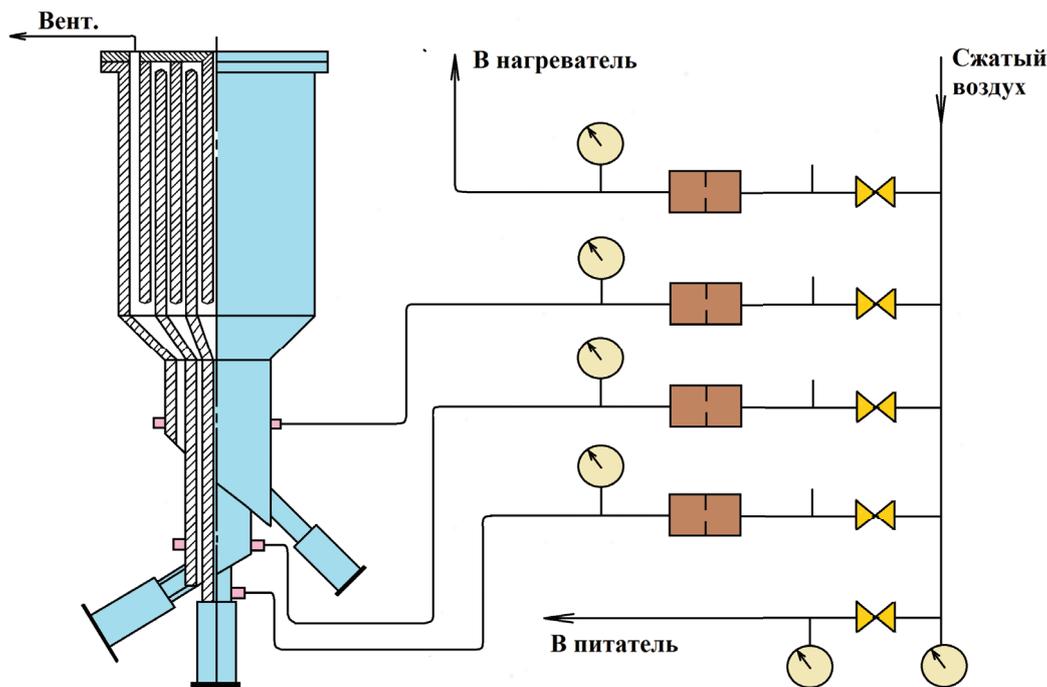


Рис. 3. Классификатор порошков гравитационного типа

Fig. 3. Gravity Type Powder Classifier

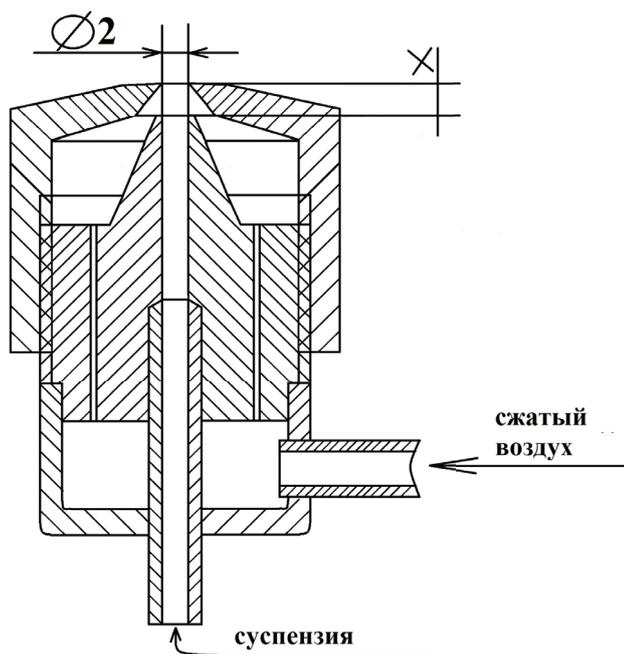


Рис. 4. Форсунка для распыления суспензий

Fig. 4. Suspension spray nozzle

На первом этапе разработанного технологического процесса осуществляется приготовление суспензии, которая подвергается в дальнейшем распылительной сушке. Связующие и растворитель для приготовления суспензий выбираются исходя из свойств получаемых композиций, а также условий гранулирования и

требований по чистоте получаемого продукта. К растворителю и связующему предъявляются определенные требования. Они должны легко и по возможности без остатка улетучиваться из конгломератов порошка при соответствующих температурных условиях. Растворитель испаряется из капель суспензии при распылении и сушке в потоке воздуха. Связующее удаляется в процессе последующего спекания композиционных частиц. По мнению авторов [23], связующее должно быть устойчивым при температурах конгломерирования и испаряться приблизительно на 50 К выше этих температур и, по крайней мере, на 50 К ниже температуры спекания субчастиц в конгломератах. Эти требования позволяют использовать широкий спектр веществ в качестве связующего, например: поливиниловый спирт, стеариновую кислоту, парафины, полиэтиленгликоль и различные смолы.

В настоящей работе для проведения распылительной сушки при комнатной температуре в качестве связующего и растворителя использовали соответственно каучук и бензин либо поливинилацетат (ПВА) и эквивалентную смесь бутилацетата и ацетона. Последняя пара является предпочтительной из-за более высокой испаряемости растворителя в процессе распыления и образования прочных конгломератов, что облег-

чает классификацию полученных порошков. Неоспоримым достоинством использования ПВА, в отличие от каучука, является возможность практически полного удаления его в процессе спекания субчастиц в конгломератах.

Количество связующего, вводимое в суспензию, существенно влияет на устойчивость последней до подачи в распылительную форсунку, а также на прочность получаемых гранул композиционных материалов. В каждом конкретном случае количество связки, вводимое в шихту из исходных мелкодисперсных порошков, определено нами экспериментально и составляет величину, варьирующую в пределах 0,5...1,5 % от массы порошка. Количество растворителя должно быть минимальным, при котором еще сохраняется подвижность суспензии, и определяется также экспериментально. Содержание связующего и растворителя в суспензии, а также тип распыляющего устройства и условия распыления определяют в конечном итоге гранулометрический состав порошков. Исходные суспензии, используемые для распыления, имеют в зависимости от плотности и дисперсности интегрированных комплексов концентрацию твердой составляющей 70...85 %. В случае недостаточной устойчивости и подвижности суспензии рекомендовано вводить добавки поверхностно-активных веществ или электролитов [24].

Для получения конгломератов, отвечающих заданному химическому составу, приготовление суспензии проводили путем тщательного перемешивания исходной шихты с растворителем и связующим в смесителях различной конструкции в течение достаточного промежутка времени, варьируемого в зависимости от состава композиции и характеристик исходных материалов в пределах от 2 до 8 часов. Более длительное время осуществляли перемешивание суспензий, в состав которых вводили небольшие количества легирующих добавок (до 2 %), например тантала, иттрия, ниобия.

Морфологию интегрированных комплексов определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN, возможности программного обеспечения которого позволили в автоматическом режиме определить размер частиц. Химический состав определяли методом микрорентгеноспектрального анализа частиц порошка с помощью энергодисперсионной

приставки OXFORD. Усреднение проводили по 20 частицам в каждой из пяти проб. Стойкость полученных интегрированных комплексов к высокотемпературному окислению определяли по результатам изменения удельной массы (ΔM) порошковой пробы после выдержки в алундовом тигле в печи электросопротивления при температуре 1324 К в течение 25 часов. Текучесть конгломерированных порошков определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 20899–98.

Результаты и их обсуждение

При конгломерировании порошков с использованием метода распылительной сушки важное значение имеет дисперсность исходных порошковых материалов. Размер субчастиц этих порошков не должен превышать 1/5 диаметра конгломератов [25]. Уменьшение размера субчастиц, во-первых, повышает подвижность и устойчивость суспензий. Во-вторых, в результате использования очень мелких исходных материалов достигается более равномерное распределение всех составляющих компонентов в готовом порошке, особенно при микролегировании. В-третьих, из мелких субчастиц образуются конгломераты с формой, близкой к сферической, менее подверженные механическому разрушению при классификации после распыления и обладающие большей текучестью. В-четвертых, увеличивается поверхность спекания субчастиц в конгломератах, и в результате повышается их прочность. При оптимальном спекании субчастиц достигается максимальная плотность конгломерированных частиц. Регулируя размер субчастиц, можно управлять в допустимых пределах плотностью порошка.

В процессе распылительной сушки суспензий происходит формирование композиционных частиц (конгломератов). Размер образующих частиц зависит от последующего спекания. Гранулометрический состав, текучесть полученного порошка, его механическая прочность зависят от используемых растворителя и связующего, их концентрации, крупности исходных порошков, расхода воздуха и распыляемой суспензии, температуры распыляющего воздуха, типа используемой форсунки.

Согласно [26] средний диаметр распыляемых частиц можно определить из эмпирического уравнения

$$d = 585 \frac{\sqrt{\sigma}}{U\gamma_p} + 507 \left(\frac{\eta}{\sqrt{\sigma\gamma_p}} \right)^{0,45} \times \left(\frac{1000G}{V} \right)^{1,5} \text{ мкм}, \quad (1)$$

где U – относительная скорость между раствором и газом, м/с; G и V – расход соответственно раствора и газа, м³/с; η – коэффициент вязкости раствора, П; σ – поверхностное натяжение раствора, дин/см; γ_p – плотность раствора, г/см³.

Из уравнения (1) видно, что для получения более мелких порошков, необходимых для плазменного напыления в динамическом вакууме, следует увеличивать скорость распыляющего воздуха, плотность используемой суспензии, уменьшать поверхностное натяжение и вязкость раствора. Снижение вязкости суспензии, в свою очередь, достигается уменьшением концентрации связки и увеличением количества растворителя.

Для выделения необходимой фракции порошка производили классификацию последнего в ситах. Отходы мелкой и крупной фракции возвращаются обратно в процесс на стадию приготовления суспензии. Фракционированные порошки спекали в свободной засыпке в вакууме или аргоне при следующих условиях: отгонку связующего (ПВА) производили при 573...723 К, после чего температуру повышали до таких значений, когда происходит спекание субчастиц в объеме конгломератов, а сами конгломераты между собой не спекаются. Температуру и время спекания для каждого состава композиционного порошка определяли экспериментально.

Результаты исследований показали, что в среднем температуру спекания конгломерированных порошков следует устанавливать на 100...250 К ниже температуры спекания компактных материалов. Оптимальными условиями спекания конгломерированных порошков следует считать такие, когда спеченная масса порошка представляет собой брикет, легко разрушающийся при раздавливании. После контрольного отсева, необходимого для удаления мелкодисперсных частиц, образующихся при разрушении отдельных гранул, и крупных спеченных между собой конгломератов, порошок готов к напылению. Форма частиц интегрированных порошков после конгломерирования в процессе

распылительной сушки близка к сферической (рис. 5). По данным микрорентгеноспектрального анализа состав полученных интегральных комплексов был следующим: 1) 71 мас. % Ni, 17 мас. % Cr, 10 мас. % Al, 1 мас. % Y; 2) 61 мас. % Ni, 22 мас. % Cr, 16 мас. % Al, 1 мас. % Y.

Если конгломерируют большие партии порошков по полной технологической схеме (см. рис. 1) с возвратом мелких и крупных фракций,

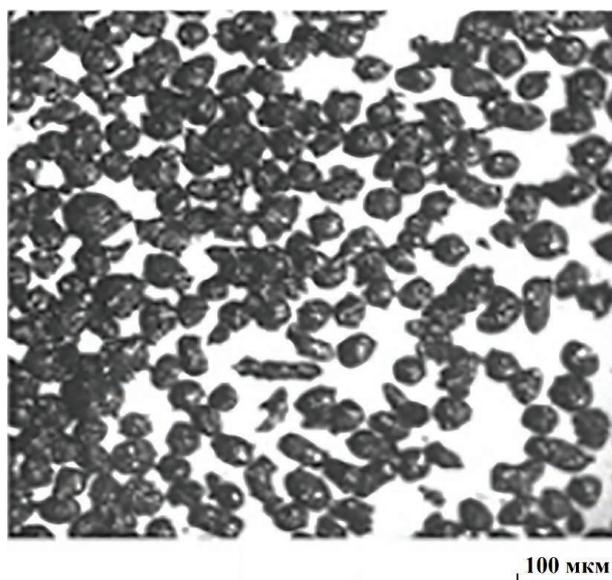


Рис. 5. Внешний вид конгломерированных порошков для напыления состава Ni-22Cr-16Al-1Y

Fig. 5. Appearance of conglomerated powders for spraying Ni-22Cr-16Al-1Y composition

то выход фракций, выделяемых для напыления, может быть приближен к 100 %. Это делает возможным получение с достаточно высокой эффективностью узкофракционных порошковых материалов для газотермического напыления.

Была проведена оптимизация процесса распылительной сушки для получения конгломератного порошка состава Ni-22Cr-16Al-1Y крупностью 0...100 мкм. Был использован полный факторный эксперимент 2³. Факторы: количество растворителя на 1 кг смешиваемого порошка V , мл/кг; избыточное давление в питателе с суспензией P , атм.; высота среза сопла над местом, где происходит впрыскивание суспензии в газовый поток, X , мм. Расход распыляющего воздуха составлял 0,5 м³/мин. Недостаточный расход воздуха приводит к налипанию порошка на стенки камеры. Порошок, осыпающийся со стенок камеры по мере высыхания, имеет плохую

сферичность и ухудшает качество конечного продукта. Давление воздуха внутри труб аэродинамического классификатора подбиралось таким образом, чтобы в центральной трубе осаждался порошок крупностью больше 100 мкм, а в двух боковых – 0...100 мкм. Крупный порошок отправлялся в головную часть процесса. Содержание фракции 0...100 мкм в «сухом» порошке было принято за параметр оптимизации (Y). В табл. 1 даны значения факторов в абсолютном и кодированном виде, здесь же представлены и результаты исследования.

С учетом значимости коэффициентов уравнение регрессии имеет следующий вид (факторы представлены в кодированном виде):

$$Y = 66,4 + 11,6X + 10,2VX, \% \quad (2)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что для получения максимального количества порошка крупностью 0...40 мкм необходимо увеличить X и V . Давление в питателе с суспензией в исследуемом интервале практически не оказывает влияния на дисперсный состав порошка. Увеличение выхода фракции 0...100 мкм в зависимости от X и V можно объяснить тем, что повышенное содержание растворителя в суспензии снижает ее вязкость и поверхностное натяжение, а это способствует дроблению струи при распылении на более мелкие частицы. При избыточном расходе растворителя и распыляемой суспензии происходит налипание порошка к стенкам распылительной камеры. Большое значение размера X приводит к дополнительному дроблению струи во внутреннем пространстве форсунки, а это ведет к увеличению количества более мелких частиц. По данным табл. 1 максимальный выход порошка 0...100 мкм получается при следующих режимах: $V = 380$ мл растворителя / 1 кг порошка; $X = 2,0$ мм; $P = 1,32$ атм.

Исследование влияния температуры распыляющего воздуха на качество распыленного порошка показало, что при температурах 363...523 К резко снижается устойчивость процесса распыления, и процесс прерывается через 1...2 мин после начала вследствие высыхания суспензии в подающем канале форсунки.

Отгонку связующего (ПВА) производили при температуре 573...773 К в течение получаса, далее температуру повышали до значений, при ко-

торых происходит спекание субчастиц в объеме конгломератов. При температуре 903...923 К начинается экзотермическая реакция взаимодействия Al с Ni, протекающая с большим выделением тепла. При этом температура тигля с порошком кратковременно поднималась до 1023...1273 К. Для предотвращения спекания конгломератов между собой производили разбавление спеченным порошком того же состава в количестве 25...35 %. После твердофазного взаимодействия осуществляли изотермический отжиг при 1073 К в течение 30 мин.

В табл. 2 представлены результаты определения гранулометрического состава спеченных порошков. Основная масса полученного порошка имеет размер больше 40 мкм. Выход фракции 0...40 мкм составляет менее 25 %. Для получения порошка, используемого при напылении в динамическом вакууме, необходимо спекать более мелкую фракцию 0...40 мкм. Из приведенных результатов видно, что при спекании порошка крупностью 0...40 мкм происходит более существенное его укрупнение за счет частичного спекания конгломератов между собой, что ухудшает морфологию конечного продукта. Это обусловлено большей площадью контактирования, чем в случае спекания фракции 40...100 мкм.

На выход фракций после спекания влияет и состав порошка. Так, при спекании порошка состава Ni-17Cr-10Al-1Y выход крупной фракции меньше, чем для порошка состава Ni-22Cr-16Al-1Y, что связано с меньшим содержанием Al и, как следствие, меньшей теплотой, выделяющейся при реакции спекания, и более низкой температурой спекания (табл. 2).

После спекания порошка производится его разделение по фракциям и восстановительный отжиг. Отсев фракции 40...100 мкм осуществляется с помощью стандартного набора сит, а отделение фракции крупностью 10...40 мкм осуществляли трехкратной отмывкой порошка в дистиллированной воде с последующей сушкой в течение 2...3 часов при температуре 373...383 К. Финишная обработка порошка – восстановительный отжиг в атмосфере водорода при 873 К в течение получаса с целью удаления окислов, присутствующих в исходных порошках и образующихся в процессе приготовления конгломератов.

Таблица 1
Table 1

Влияние режимов распылительной сушки и последующего спекания на гранулометрический состав получаемых порошков
Influence of spray drying and subsequent sintering modes on the particle size distribution of the resulting powders

Номер опыта	Режим распыления						Выход фракции 0...100 мкм, %	Выход порошка после спекания (фракция 0..100 мкм), %				Стойкость порошков (10...40 мкм) Ni-22Cr-16Al-1Y против окисления на воздухе при 1323 К (привес за 6 ч), мг/г
	V, мл/кг		X, мм		P, атм			0..40 мкм	40..63 мкм	63..100 мкм	>100 мкм	
	абс	код	абс	код	абс	код						
1	380	+	2	+	1,32	+	12,8	15,8	48,3	23,1	107,9	
2	360	-	2	+	1,32	+	21,6	9,4	51,8	17,2	39,8	
3	380	+	1	-	1,32	+	8,4	17,2	51,9	22,5	77,4	
4	360	-	1	-	1,32	+	23,5	15,6	45,6	15,3	91,8	
5	380	+	2	+	1,08	-	20,2	20,5	46,6	12,7	48,0	
6	360	-	2	+	1,08	-	23,8	16,6	39,9	19,7	108,0	
7	380	+	1	-	1,08	-	7,9	19,4	55,8	16,9	45,3	
8	360	-	1	-	1,08	-	20,6	15,6	47,0	1,08	68,0	

Таблица 2

Table 2

Влияние исходного гранулометрического и химического состава на выход порошка после спекания
Influence of the initial particle size distribution and chemical composition on the powder after sintering

Химический состав порошков, масс. %	Исходная крупность порошков, мкм	Выход порошков после распыления, %	Гранулометрический состав после спекания, %			
			0...40, мкм	40...63, мкм	63...100, мкм	>100 мкм
Ni-17Cr-10Al-1Y	0...100	–	29,2	36,0	28,1	5,6
Ni-22Cr-16Al-1Y	0...100	–	24,0	37,6	27,4	11,0
	0...40	35,8	61,4	32,3	6,6	–
	40...100	64,2	7,7	35,1	44,1	1,3

Для оценки качества получаемых порошков измерили их стойкость против окисления на воздухе при 1323 К. Результаты испытаний могут быть описаны уравнением регрессии следующего вида:

$$\begin{aligned} \Delta M = & 73,3 - 3,63V + 2,65X + \\ & + 5,95P + 5,65VX + 17,05VP - \\ & - 8,03XP + 14,95XVP, \text{ мг / г.} \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с экспериментальными данными для улучшения качества порошка следует снижать в распыляемой суспензии количество растворителя (V), увеличить X и избыточное давление в камере (P). На практике, как правило, стремятся снизить объем растворителя, поэтому для получения порошков для плазменного напыления в динамическом вакууме нами был определен следующий технологический регламент: $V = 360$ мл/1 кг порошка; $X = 2,0$ мм; $P = 1,28$ атм.

Порошки, полученные с подогревом распыляющего воздуха, характеризуются более низкой жаростойкостью, например, для 363 К – 170,9 мг/г, а для 523 К – 208,6 мг/г. Это свидетельствует о том, что в процессе распыления происходит ускоренная сушка конгломератов, приводящая к деформированию и формированию повышенной пористости частиц.

Нами было проведено сравнительное исследование свойств порошков, полученных с использованием распылительной сушки и распылением расплава в вакууме (табл. 3).

Оба метода применительно к плазменному напылению дают порошки, близкие по свойствам. Однако метод распылительной сушки

является более дешевым и универсальным в отношении производимых порошков. Химический состав порошка, полученного с помощью метода распылительной сушки, практически не отличается от состава исходных компонентов.

Для придания распыленным конгломератам достаточной прочности и плотности производится их спекание, включающее в себя стадии удаления органического связующего и спекания субчастиц в конгломерате. Процесс спекания распыленного порошка оказывает существенное влияние на свойства получаемого продукта. От условий протекания процесса во многом зависит морфология, прочность частиц и их гранулометрический состав.

После распылительной сушки порошок помещают в свободной засыпке в вакуумную печь. Далее печное пространство вакуумируют и заполняют аргоном до давления 0,1 МПа. Затем плавно поднимают температуру со скоростью не выше $3...4 \text{ К} \cdot \text{мин}^{-1}$ с целью удаления связующего. В случае использования в качестве связующего поливинилацетата (ПВА) температура его полного удаления из массы порошка составляет примерно 820 К. Затем производится вакуумирование рабочего пространства печи до остаточного давления 0,1 Па и производится нагрев до температур спекания. Возможно проведение процесса спекания при атмосферном давлении, например в аргоно-водородной газовой среде. При этом значительно снижается степень окисленности материала порошка.

Некоторыми особенностями отличается процесс спекания порошков состава Ni-Cr-Al-Me, где Me – легирующие добавки одного или не-

Сравнительные характеристики порошков, полученных методом распылительной сушки и распылением расплавов

Comparative characteristics of powders obtained by spray drying and spraying of melts

Характеристика порошка	Метод получения	Крупность порошков, мкм					
		0...40	40...50	50...63	63...100	100...200	>200
Содержание, масс. %	Распылительная сушка	61,4	16,3	16,0	6,6	0	0
	Распыление расплавов	50,5	24,2	13,4	9,1	1,8	0,9
Текучесть, с	Распылительная сушка	69,9	34,2	28,8	23,5	–	–
	Распыление расплавов	57,8	25,3	28,0	31,5	–	–

скольких редких элементов, таких как Y, Ta, Nb. Эти конгломератные порошки обладают экзотермичностью за счет реакции образования алюминидов никеля. Реакция синтеза начинается при нагреве порошков до 900...950 К. При этом в реакционном пространстве печи температура поднимается до 1500 К. В этих условиях конгломераты сильно спекаются между собой, а это по технологии недопустимо. Чтобы снизить температуру спекания порошков, проводили разбавление в определенном соотношении распыленного порошка готовым спеченным порошком того же состава перед тем, как поместить его в печь. Степень разбавления в конечном итоге определяет температуру нагрева порошка и, как следствие, плотность и механическую прочность спеченных конгломератов. Для получения прочных и плотных гранул порошка состава Ni-Cr-Al-Me с различным содержанием хрома (20...28 %) и алюминия (12...20 %) было определено, что оптимальное количество порошка-разбавителя должно составлять от 20 до 40 %. Например, порошок состава (масс. %): Ni-28Cr-20Al-Me целесообразно спекать с разбавлением до 40 %.

После протекания экзотермической реакции устанавливают температуру в печи 1020 К и выдерживают при ней в течение получаса до полного спекания субчастиц в конгломератах. В результате спекания образуется брикет, легко

разрушающийся при раздавливании на отдельные гранулы. Для отделения от порошка мелких частиц, образующихся в результате разрушения отдельных гранул, и крупных спекшихся между собой конгломератов производится контрольный рассев. Фракция порошка, пригодная для напыления, подвергается восстановительному отжигу в атмосфере водорода при температуре 800 К. Весьма важно, что небольшие количества легирующих элементов практически не оказывают влияния на режимы спекания порошка.

В заключение необходимо отметить, что полученный композиционный конгломератный гранулированный порошковый материал был применен для создания комбинированного теплостойкого покрытия для защиты деталей высокотемпературного назначения маршевой газотурбинной установки. Покрытие состоит из трех слоев. Первый слой 28Al-2Si-1P3M толщиной 40...55 мкм наносится термодиффузионным методом и расположен на границе со сплавом-основой [15]. Этот слой обеспечивает высокую жаро- и коррозионную стойкость, а также диффузионную стабильность всего покрытия в целом. Второй – плазменный слой состава Ni-22Cr-16Al-1Y толщиной 115 мкм – обеспечивает высокую термостойкость покрытия, а также хорошую адгезию керамического внешнего слоя к поверхности. Третий – внешний кера-

мический слой состава $ZrO_2+Y_2O_3$ толщиной около 50 мкм – является теплозащитным, он снижает температуру поверхности сплава в процессе эксплуатации.

Заключение

Разработана технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий. Отличительной особенностью этой технологии является использование метода распылительной сушки и последующего спекания в вакууме или в аргоно-водородной газовой среде.

Для определения гранулометрического состава сконструирован и изготовлен аэродинамический классификатор гравитационного типа, который в автоматическом режиме позволяет рассортировать порошок по фракциям.

Предлагаемая технология позволяет получать порошки заданного химического состава с формой частиц, близкой к сферической, размерами в интервале 40...100 мкм. Были получены интегрированные порошковые комплексы следующих химических составов: 1) 71 мас. % Ni, 17 мас. % Cr, 10 мас. % Al, 1 мас. % Y; 2) 61 мас. % Ni, 22 мас. % Cr, 16 мас. % Al, 1 мас. % Y.

Показано, что при спекании порошков состава Ni-Cr-Al-Y следует учитывать экзотермическую реакцию образования алюминидов никеля, начинающуюся при нагреве порошков до 900...950 К. Для получения интегрированного порошкового комплекса с повышенным содержанием алюминия (Ni-22Cr-16Al-1Y) предложено использовать разбавление готовым спеченным порошком того же состава перед загрузкой в печь.

Список литературы

1. *Rickerby D.S., Winstone M.R.* Coatings for gas turbines // *Journal of Manufacturing Processes*. – 1992. – Vol. 7, iss. 4. – P. 485–526. – DOI: 10.1080/10426919208947439.
2. *Burgel R.* Coating service experience with industrial gas turbines // *Journal of Materials Science and Technology*. – 1986. – Vol. 2. – P. 302–308. – DOI: 10.1179/mst.1986.2.3.302.
3. *Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б.* Упрочняющие защитные покрытия в машиностро-

ении. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 244 с. – ISBN 5-7691-1405-3.

4. *Chaki T.K., Singht A.K., Sadananda K.* Effect of Co-Cr-Al-Y coating on microstructural stability and creep behavior of nickel-base superalloy // *Thin Solid Films*. – 1989. – Vol. 168. – P. 207–220. – DOI: 10.1016/0040-6090(89)90007-2.

5. *Мубояджан С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П.* Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. – Екатеринбург: Квист, 2008. – 208 с. – ISBN 5-900474-60-7.

6. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.

7. *Usitalo M.A., Vuristo P.M.J., Mantyla T.A.* Elevated temperature erosion-corrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments // *Wear*. – 2002. – Vol. 252, iss. 7–8. – P. 586–594. – DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00014-5.

8. *Lai G.Y.* High-temperature corrosion and materials application. – Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. – 461 p. – ISBN 978-0-87170-853-3.

9. *Sidhu S.S., Prakash S.* Performance of NiCrAlY, Ni-Cr, Stellite-6 and Ni3Al coatings in Na2SO4-60% V2O5 environment at 900° under cyclic conditions // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201, iss. 3–4. – P. 1643–1654. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.035.

10. *Matthews S., Schweizer M.* Optimization of arc-sprayed Ni-Cr-Ti coatings for high temperature corrosion applications // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol. 22, iss. 4. – P. 538–550. – DOI: 10.1007/s11666-013-9914-y.

11. Конгломерированные композиционные порошки для газотермического напыления / В.Р. Калиновский, Ю.В. Соколов, А.Ф. Ильющенко, В.В. Троцкий, А.В. Калиновский // *Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении»* / под ред. Л.Г. Ворошина. – Минск, 2004. – С. 124–133.

12. *Ильинкова Т.А., Барсукова Е.А., Тагиров А.Т.* Взаимосвязь характеристик порошковых материалов и механических свойств плазменных теплозащитных покрытий // *Вестник технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 15. – С. 116–121.

13. Особенности структуры и свойств $\gamma+\beta$ сплавов Ni-Cr-Al вблизи эвтектического состава / С.В. Косицын, Б.Н. Гузанов, С.Д. Алексин, А.А. Копылов // *Физика металлов и металловедение*. – 1990. – № 9. – С. 114–122.

14. *Tingaud D., Nardou F.* Influence of non-reactive particles on the microstructure of NiAl and NiAl-ZrO2

processed by thermal explosion // *Intermetallics*. – 2008. – Vol. 16, iss. 5. – P. 732–737. – DOI: 10.1016/j.intermet.2008.02.016.

15. Пугачева Н.Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа, никеля и кобальта // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2015. – Iss. 3. – P. 51–82. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. – URL: https://www.dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N_B_051_082..pdf (дата обращения: 14.01.2021).

16. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating / N.B. Pugacheva, B.N. Guzanov, N.V. Obabkov, T.M. Bykova, N.S. Michurov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030013-1–030013-4. – DOI: 10.1063/1.5135137.

17. Особенности создания комбинированных теплостойких покрытий для деталей высокотемпературного назначения / Б.Н. Гузанов, Н.Б. Пугачева, В.Д. Алексеев, Е.Ю. Слукин // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 12–19. – DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.02.

18. Белопольский М.С. Сушка керамических суспензий в распылительных сушилках. – М.: Стройиздат, 1972. – 126 с.

19. Поляков А.А., Круглицкий Н.Н. Распылительная сушка в технологии радиоэлектронных материалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 70 с.

20. Лыков М.М., Леончик Б.И. Распылительные сушилки. – М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.

21. Патент 3960545 США, МКИ В 22 F 9/00. Cermet plasma flame spray powder, method for producing same and articles produced the reform / Port D.J., Lafferty W.D., Cheney R.F. (USA); GTE Sylvania Incorporated (USA). – N 561638. – Publ. 01.06.1976.

22. Патент 4025334 США, МКИ В 22 F 1/00, С 23 С 7/00. Tungsten carbide-cobalt flame spray powder and method / Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. (USA); GTE Sylvania Incorporated (USA). – N 674961. – Publ. 24.05.1977.

23. Патент 3881911 США, МКИ С 22 С 1/04-1/05, С 04 В 35/52-35/38. Free flowing, sintered refractory agglomerates / Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. (USA); GTE Sylvania Incorporated (USA). – N 411663. – Publ. 06.05.1975.

24. *Stecura S.* Effects of yttrium, aluminum and chromium concentrations in bond coatings on the performance of zirconia-yttria thermal barriers // *Thin Solid Films*. – 1980. – Vol. 73, iss. 2. – P. 481–489. – DOI: 10.1016/0040-6090(80)90521-0.

25. *Mrdak M.R.* Mechanical properties and metallographic analysis of plasma spray ABS – Ni5.5wt.%Al5wt.%Mo coatings // *Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier*. – 2019. – Vol. 67, iss. 3. – P. 573–587. – DOI: 10.5937/vojtehg67-17424.

26. *Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев В.И.* Распыливание жидкости форсунками. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.

Конфликт интересов

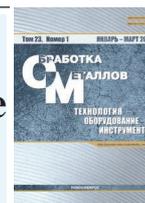
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Technology of obtaining composite conglomerate powders for plasma spraying of high-temperature protective coatings

Boris Guzanov^{1, a}, **Natalia Pugacheva**^{2, b}, **Evgeniy Slukin**^{3, c}, **Tatiana Bykova**^{2, d *}

¹ Russian State Vocational Pedagogical University, 11 Mashinostroiteley str., Ekaterinburg, 620012, Russian Federation

² Institute of Engineering Science, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-5698-0018>, guzanov_bn@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>, nat@imach.uran.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4807-5135>, slukin@cniim-ekt.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>, tatiana_8801@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 October 2020

Revised: 18 November 2020

Accepted: 14 December 2020

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Coatings

Plasma spraying

Powder

Fraction

Binder

Solvent

Conglomerate

Funding

The work was carried out with partial funding under the theme No. AAAA-A18-118020790145-0 of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

ABSTRACT

Introduction. For parts of gas turbines operating under conditions of corrosion-erosion and intense wear, the most acceptable are compositions containing Ni, Co, Cr, Al, B, Y both in pure form and in the composition of compounds applied on the contact surface during thermal spraying. Modern integrated complexes obtained by combining dissimilar substances in the form of a single composition are promising. Such powders are obtained either by cladding or by conglomeration of finely dispersed starting components into a larger particle. The problem of developing and manufacturing plants for conglomeration of powders is urgent and practically important, since it makes it possible to obtain material for thermal spraying of coatings for high-temperature purposes. **The aim of the work** is to develop a technological scheme for obtaining powders of the required chemical composition with a given particle shape and size, intended for spraying high-temperature protective coatings. **Materials and research methods.** A technology is developed for the production of integrated powders for spraying coatings using the method of spray drying and subsequent sintering in vacuum or in an argon-hydrogen atmosphere, which avoids the loss of feedstock due to the return of fine and coarse fractions. A technology for preparing materials for spray drying and granulation is proposed. A gravity type aerodynamic classifier is designed and manufactured, which makes it possible to select automatically the powder fraction necessary for spraying the coating, as well as return the unwanted fraction for recycling. The morphology of the granular powder is determined using a TESCAN scanning electron microscope. The chemical composition of the resulting integrated complexes is determined by X-ray microanalysis on an OXFORD attachment. **Results and discussion.** The technological conditions for obtaining powders of a given size (40...100 μm) are established. It is shown that the shape of the conglomerate particles after spray drying is close to spherical. On the basis of a multifactor experiment, the optimization of the technological process for obtaining powders Ni-17Cr-10Al-1Y and Ni-22Cr-16Al-1Y with sizes up to 100 μm is performed. It is shown that when conglomerating powders with increased aluminum content (Ni-22Cr-16Al-1Y), it is necessary to take into account the exothermic reaction of nickel aluminide formation and dilute the mixture of initial components before sintering with the finished sintered powder. The resulting integrated complexes are characterized by high heat resistance; therefore they are designed and successfully used for plasma spraying of protective coatings for high-temperature purposes. **Conclusions.** A technology is developed for obtaining composite conglomerated powders Ni-17C-10Al-1Y and Ni-22Cr-16Al-1Y with particle sizes up to 100 μm and a shape close to spherical. A distinctive feature of this technology is that it avoids the loss of feedstock by returning fine and coarse fractions.

For citation: Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Slukin E.Yu., Bykova T.M. Technology of obtaining composite conglomerate powders for plasma spraying of high-temperature protective coatings. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-6-20. (In Russian).

* Corresponding author

Bykova Tatiana M., Ph.D. (Engineering), Scientific associate
Institute of Engineering Science,
Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya str.,
620049, Ekaterinburg, Russian Federation
Tel.: 8 (343) 362-30-43, e-mail: tatiana_8801@mail.ru

References

1. Rickerby D.S., Winstone M.R. Coatings for gas tyrbines. *Journal of Manufacturing Processes*, 1992, vol. 7, iss. 4, pp. 485–526. DOI: 10.1080/10426919208947439.
2. Burgel R. Coating service experience with industrial gas turbines. *Journal of Materials Science and Technology*, 1986, vol. 2, pp. 302–308. DOI: 10.1179/mst.1986.2.3.302.
3. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Reinforcing protective coatings in engineering industry]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 2003. 244 p. ISBN 5-7691-1405-3.
4. Chaki T.K., Singht A.K., Sadananda K. Effect of Co-Cr-Al-Y coating on microstructural stability and creep behavior of nickel-base superalloy. *Thin Solid Films*, 1989, vol. 168, pp. 207–220. DOI: 10.1016 / 0040-6090 (89) 90007-2.
5. Muboyadzhn S.A., Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P. *Kompleksnye zashchitnye pokrytiya turbinnykh lopatok aviatsionnykh GTD* [Complex protective coatings for turbine blades of aircraft gas turbine engines]. Ekaterinburg, Kvist Publ., 2008. 208 p. ISBN 5-900474-60-7.
6. Kulik A.Ya., Borisov Yu.S., Mnukhin A.S., Nikitin M.D. *Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov* [Gas thermal spraying of composite powders]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985. 199 p.
7. Uusitalo M.A., Vuristo P.M.J., Mantyla T.A. Elevated temperature erosion-corrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments. *Wear*, 2002, vol. 252, iss. 7–8, pp. 586–594. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00014-5.
8. Lai G.Y. *High-temperature corrosion and materials application*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2007. 461 p. ISBN 978-0-87170-853-3.
9. Sidhu S.S., Prakash S. Performance of NiCrAlY, Ni-Cr, Stellite-6 and Ni₃Al coatings in Na₂SO₄-60% V₂O₅ environment at 900° under cyclic conditions. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, iss. 3–4, pp. 1643–1654. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.035.
10. Matthews S., Schweizer M. Optimization of arc-sprayed Ni-Cr-Ti coatings for high temperature corrosion applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, vol. 22, iss. 4, pp. 538–550. DOI: 10.1007/s11666-013-9914-y.
11. Kalinovskii V.R., Sokolov Yu.V., Il'yushchenko A.F., Troshchii V.V., Kalinovskii A.V. Konglomerirovannye kompozitsionnye poroshki dlya gazotermicheskogo napyleniya [Conglomerated composite powders for gas-thermal spraying]. *Perspektivy razvitiya poverkhnostnogo i ob'emnogo uprochneniya splavov* [Prospects for the development of surface and volumetric hardening of alloys]. Ed. by L.G. Voroshin. Minsk, 2004, pp. 124–133.
12. Ilinkova T.A., Barsukova E.A., Tagirov A.T. Vzaimosvyaz' kharakteristik poroshkovykh materialov i mekhanicheskikh svoystv plazmennyykh teplozashchitnykh pokrytii [The relationship between the characteristics of powder materials and the mechanical properties of plasma heat-shielding coatings]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 15, pp. 116–121.
13. Kositsyn S.V., Guzanov B.N., Aleksin S.D., Kopylov A.A. Osobennosti struktury i svoystv $\gamma + \beta$ splavov Ni-Cr-Al vblizi evtekticheskogo sostava [Features of the structure and properties of $\gamma + \beta$ alloys Ni-Cr-Al near the eutectic composition]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 1990, no. 9, pp. 114–122. (In Russian).
14. Tingaud D., Nardou F. Influence of non-reactive particles on the microstructure of NiAl and NiAl-ZrO₂ processed by thermal explosion. *Intermetallics*, 2008, vol. 16, iss. 5, pp. 732–737. DOI: 10.1016/j.intermet.2008.02.016.
15. Pugacheva N.B. Current trends in the development of heat-resistant coatings based on aluminides of iron, nickel and cobalt. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, iss. 3, pp. 51–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. Available at: https://www.dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N._B._051_082..pdf (accessed 14.01.2021).
16. Pugacheva N.B., Guzanov B.N., Obabkov N.V., Bykova T.M., Michurov N.S. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2176, pp. 030013-1–030013-4. DOI: 10.1063 / 1.5135137.
17. Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Alekseev V.D., Slukin E.Yu. Osobennosti sozdaniya kombinirovannykh teplostoikikh pokrytii dlya detalei vysokotemperaturnogo naznacheniya [Features of the creation of combined heat-resistant coatings for high-temperature parts]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, iss. 3, pp. 12–19. DOI: 10.15593 / 2224-9877 / 2020.3.02.

18. Belopol'skii M.S. *Sushka keramicheskikh suspenzii v raspylitel'nykh sushilkakh* [Drying of ceramic suspensions in spray dryers]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1972. 126 p.
19. Polyakov A.A., Kruglitskii N.N. *Raspylitel'naya sushka v tekhnologii radioelektronnykh materialov* [Spray drying in radio electronic materials technology]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 70 p.
20. Lykov M.M., Leonchik B.I. *Raspylitel'nye sushilki* [Spray dryers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 331 p.
21. Port D.J., Lafferty W.D., Cheney R.F. *Cermet plasma flame spray powder, method for producing same and articles produced the reform*. Patent USA, no. 3960545, 1976.
22. Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. *Tungsten carbide-cobalt flame spray powder and method*. Patent USA, no. 4025334, 1977.
23. Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. Free flowing, sintered refractory agglomerates. Patent USA, no. 3881911, 1975.
24. Stecura S. Effects of yttrium, aluminum and chromium concentrations in bond coatings on the performance of zirconia-yttrium thermal barriers. *Thin Solid Films*, 1980, vol. 73, iss. 2, pp. 481–489. DOI: 10.1016 / 0040-6090 (80) 90521-0.
25. Mrdak M.R. Mechanical properties and metallographic analysis of plasma spray ABS – Ni5.5wt.%Al5wt.%Mo coatings. *Vojnotehnički glasnik / Militaru technical courier*, 2019, vol. 67, iss. 3, pp. 573–587. DOI: 10.5937/vojtehg67-17424.
26. Vitman L.A., Kandelson B.D., Paleev V.I. *Raspylivanie zhidkosti forsunkami* [Spraying liquid with nozzles]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962. 264 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).