

УДК 621.762

*И.В. Яцюк<sup>1</sup>, Н.И. Артеменко<sup>1</sup>, О.Н. Доронин<sup>1</sup>, С.В. Неруш<sup>1</sup>***ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОВОЙ АТОМИЗАЦИИ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ  
МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ АТМОСФЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-3-9

*Во ФГУП «ВИАМ» с применением технологии газовой атомизации освоен полный цикл получения металлопорошковых композиций (МПК) из сплавов системы Ni–Cr–Al–Y, являющихся уникальными материалами нового поколения, применяемых в технологии атмосферно-плазменного напыления покрытий на ответственные детали и узлы, в том числе крупногабаритные. Полученные МПК предназначены для замены зарубежных порошков, ввоз которых ограничен в связи с введением экономических санкций по отношению к России.*

*Проведены исследования структуры и свойств полученных МПК. Газотермические покрытия, наносимые с использованием полученных МПК, характеризуются высокой однородностью и равномерной структурой.*

**Ключевые слова:** *металлопорошковая композиция, газовая атомизация, атмосферно-плазменное напыление, никелевый сплав.*

*I.V. Iatsyuk<sup>1</sup>, N.I. Artemenko<sup>1</sup>, O.N. Doronin<sup>1</sup>, S.V. Nerush<sup>1</sup>***APPLICATION OF GAS ATOMIZATION TECHNOLOGY  
TO OBTAIN HIGH-QUALITY METAL POWDER COMPOSITIONS  
FOR APPLYING ATMOSPHERIC PLASMA COATINGS**

*FSUE «VIAM», using gas atomization technology, has mastered the full cycle of producing metal powder compositions (MPC) from alloys of the Ni–Cr–Al–Y system, which are unique materials of a new generation and are applicable in the technology of atmospheric plasma spraying of coatings on critical parts and assemblies, including large ones. The obtained MPC are intended to replace foreign powders, the import of which is limited due to the introduction of economic sanctions against Russia.*

*Studies of the structure and properties of the obtained MPC are carried out. Thermal coatings applied using the obtained MPC are characterized by high uniformity and uniform structure.*

**Keywords:** *metal powder composition, gas atomization, atmospheric plasma spraying, nickel alloy.*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

В современной авиационной промышленности постоянно востребовано развитие новых технологий и материалов, позволяющих повысить свойства и рабочий ресурс различного рода ответственных изделий. В настоящее время одна из наиболее актуальных научно-технических задач – повышение эксплуатационных характеристик узлов и агрегатов, работающих в условиях высоких температур, нагрузок и агрессивных сред.

Зачастую достаточным является модифицирование поверхности путем нанесения многофункциональных покрытий. Широкое промышленное применение имеет технология атмосферно-плазменного напыления (atmospheric plasma spraying – APS) [1]. Покрытия, нанесенные методом APS, используются для защиты крупногабаритных деталей, в том числе камер сгорания, а также деталей горячего тракта промышленных и энергетических газотурбинных установок. Неоспоримым преимуществом данной технологии является возможность нанесения покрытий практически без ограничений по размерам, а особенность технологии заключается в том, что для процессов APS характерны малые тепловые деформации и во многих случаях отсутствие структурных изменений в детали. По технологии APS наносят антифрикционные, износостойкие, коррозионностойкие, термостойкие, термобарьерные, электроизоляционные, электропроводящие покрытия. Кроме того, ограничения по составу наносимых материалов незначительны [2]. Следует отметить, что по данной технологии наносят, как правило, достаточно толстые покрытия, толщина которых зависит от распыляемого порошкового материала с оптимальным размером частиц 20–100 мкм, т. е. толщина покрытия редко бывает <20 мкм, а использование порошковых фракций <20 мкм недопустимо технологически из-за низкой текучести мелких фракций и большей вероятности образования оксидных пленок ввиду большей площади поверхности [2].

Основным сырьем для нанесения покрытий по технологии APS являются металлические и металлокерамические порошки. Производство металлических порошков или металлопорошковых композиций (МПК) в промышленных масштабах началось еще в середине XX в. В настоящее время в мире производится ~500 тыс. тонн МПК в год, получаемых по технологиям распыления, в том числе методом газовой атомизации [3–5]. налажено производство порошков железа, алюминия, свинца, меди, цинка, титана, циркония, молибдена, вольфрама, тантала, а также различных сплавов – жаропрочных и жаростойких на никель-кобальтовой основе, востребованных в производстве деталей авиационных и энергетических ГТД и ГТУ. Следует отметить, что технологии получения МПК, основанные на распылении расплавов, особенно эффективны при получении порошков высоколегированных и многокомпонентных сплавов. Для таких МПК характерны высокая степень однородности, равномерность химического состава и дисперсное строение литого металла [3–5].

До недавнего времени в России активно применяли МПК таких фирм, как Praxair Surface Technologies (США), Oerlikon Metco (Швейцария), Siemens AG (Германия), Metallizing Equipment Co Pvt. Ltd (Индия), Höganäs AB (Швеция), а также порошки украинского производства. В настоящее время поставки качественных зарубежных порошков ограничены в связи с введением США и странами ЕС экономических санкций по отношению к Российской Федерации. В общей сложности на отечественном рынке востребованы МПК более 60 марок зарубежных материалов, в том числе необходимых для локализации производства ГТУ и газоперекачивающих агрегатов фирм Siemens AG (Германия), General Electric (США) и др.

Во ФГУП «ВИАМ» впервые в Российской Федерации освоен полный цикл импортозамещающих технологий нанесения жаростойких и коррозионностойких покрытий систем (Ni, Co, Ni–Co)Cr–Al–Y для деталей авиационных и энергетических ГТД и ГТУ [6–8]. Для замены импортных материалов, широко применяемых в отечественном и зарубежном газотурбостроении, под марками СДП и ВСДП освоено производство МПК из сплавов систем (Ni–Co)Cr–Al–Y. Покрытия, наносимые по технологии APS на основе специальных сплавов, разработанных во ФГУП «ВИАМ», по ряду эксплуатационных характеристик превосходят лучшие мировые аналоги за счет легирования W, Ta, Hf, Re и др. (вольфрам, тантал и рений тормозят развитие процессов диффузии на границе

«сплав–покрытие» за счет образования в сплавах, содержащих углерод, термически стабильных карбидов; гафний повышает адгезию оксидной пленки на поверхности покрытия [9–12]) в необходимых количествах, что обеспечивает стабильность свойств материала покрытия при температурах до 1200 °С, стойкость к солевой и сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750–950 °С; химический состав покрытий идентичен таковому для исходных порошков. Следует отметить, что наличие данных элементов в составе МПК делает их уникальным материалом нового поколения, не имеющим аналогов. Распыление порошковых материалов системы Ni–Cr–Al–Y для полного замещения зарубежных МПК производится методом газовой атомизации.

Результаты сравнительного исследования покрытий, полученных методами атмосферно-плазменного напыления с использованием полностью аналогичных порошков зарубежного производства и производства ФГУП «ВИАМ», показали, что отечественные порошковые материалы позволяют наносить более равномерный по толщине жаростойкий соединительный слой (средний разброс толщины покрытий 3–5%) по сравнению с покрытиями, полученными с использованием зарубежных порошковых материалов-аналогов (средний разброс – до 10%). Структура покрытий типична для атмосферно-плазменных покрытий. Более высокая равномерность покрытий, полученных с применением отечественных материалов, может объясняться более узкой фракцией используемых порошков и отсутствием нецелевой фракции.

Цель данной работы – изучение структуры и свойств металлопорошковой композиции из сплава системы Ni–Cr–Al–Y, полученной по технологии газовой атомизации и применяемой в технологии атмосферно-плазменного нанесения покрытий на детали авиационных и энергетических ГТД и ГТУ.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных проблем 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» и 17.4. «Многослойные защитные покрытия и плазмохимическое оборудование для осаждения защитных и упрочняющих покрытий из газовых потоков плазмы, содержащих прекурсоры элементов синтезируемого покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана МПК из сплава на никелевой основе марки ВСДП-3. Порошок получали методом газовой атомизации на установке HERMIGA 10/100 VI, оснащенной индукционным плавильным блоком с донным сливом. Исходную шихтовую заготовку для процесса газовой атомизации выплавляли в вакуумной плавильной установке УППФ-3М с использованием специальной разливочной оснастки для получения электродов  $\varnothing 30$  мм [14]. Поверхность исходной заготовки предварительно подвергали пескоструйной обработке. Распыление жидкого металла проводили холодным газом с использованием сверхзвукового сопла форсунки.

Исследование гранулометрического состава МПК проводили после процесса газовой атомизации с помощью виброгрохота Analizzette 3 Spartan (Германия) с комплектом сит (от 40 до 200 мкм) и классификатора, принцип действия которого основан на газодинамической сепарации частиц порошка в зависимости от их массы, имеющего рабочий диапазон от 1 до 70 мкм. Масса пробы составляла  $100 \pm 1$  г; время отсева 30 мин.

Химический состав исходных шихтовых заготовок и полученной МПК определяли с использованием атомно-эмиссионного спектрометра Agilent 5100 ICP-OES. Анализ газовых примесей в порошках проводили без предварительной дегазации на газоанализаторах фирмы Leco: CS-600 – для анализа по сере и углероду, TC-600 – для анализа по кислороду и азоту.

Нанесение теплозащитных покрытий Amdry 962+(Metco 204C–XCL) и ВСДП-3+(ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) на образцы из сплава Х20Н80 толщиной 3 мм для сравнительных структурных исследований проводили на установке атмосферного плазменного напыления MP200 фирмы AMT AG (Швейцария) с использованием плазмотрона Metco F4. В качестве плазмообразующих газов применяли аргон и азот. Перемещение плазмотрона осуществляли шестикоординатным промышленным роботом АBB серии IRB.

Для нанесения покрытия использовали МПК, представленные в таблице.

**Характеристики используемых МПК**

Наименование	Фракция, мкм	Производитель
Amdry 962	53–106	Oerlikon Metco
Metco 204C–XCL	45–140	Oerlikon Metco
ВСДП-3	40–100	ФГУП «ВИАМ»
ZrO <sub>2</sub> –Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45–140	ООО «Т:СП»

Подачу порошка осуществляли через порошокый питатель на срез сопла плазмотрона; в качестве транспортирующего газа использовали аргон; волюмометрический расход металлических порошков составлял 1 см<sup>3</sup>/мин, керамических порошков 2 см<sup>3</sup>/мин. Режимы напыления соответствовали технологии, разработанной во ФГУП «ВИАМ» для нанесения теплозащитных покрытий методом атмосферного плазменного напыления; скорость перемещения плазмотрона подбирали в соответствии с необходимой толщиной металлического и керамического слоев теплозащитного покрытия Amdry 962+(Metco 204C–XCL): 100–150 мкм – для металлического слоя и 340–400 мкм – для керамического. Режимы нанесения теплозащитного покрытия ВСДП-3+(ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) намеренно оставлены без изменений с целью проведения сравнения полученных теплозащитных покрытий из порошков иностранного и отечественного производства.

Микроструктуру поверхности частиц порошка исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JSM-840 в режиме обратноотраженных электронов. Контраст изображения в этом режиме определяется средним атомным номером исследуемой области или фазы. Чем выше средний атомный номер исследуемой области, тем светлее данный участок выглядит на фотографии.

Металлографические исследования покрытий проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51 по ГОСТ 22838–77 с цифровой системой обработки изображения при увеличении ×500.

### **Результаты и обсуждение**

Гранулометрический состав металлопорошковой композиции помимо параметров процесса газовой атомизации, таких как давление распыления, избыточное давление над зеркалом расплава, температура расплава, во многом определяется химическим составом распыляемых материалов, жидкотекучестью и вязкостью расплава (влияет на расход металла) и его поверхностным натяжением. Гранулометрический состав МПК из сплава марки ВСДП-3 включает: 13% мелкой фракции с размером частиц до 20 мкм; ~60% частиц порошка представлены фракцией 20–45 мкм; остальные 27% – крупными фракциями размером >45 мкм. Внешний вид МПК из сплава марки ВСДП-3 в состоянии свободной насыпки представлен на рис. 1.

Химический состав МПК качественно не отличается от химического состава исходной заготовки под распыление, химический состав которой, в свою очередь, соответствует требованиям ТУ 1-595-2-1217–2011 «Литые трубные катоды из никелевых сплавов марок ВСДП-3 и ВСДП-4». Количественные отклонения химического состава

МПК от химического состава заготовки под распыление незначительны (не превышают 1–5% в зависимости от элемента) и в целом также соответствуют требованиям в указанном ТУ.



Рис. 1. Металлопорошковая композиция из сплава марки ВСДП-3 в состоянии свободной насыпки

Содержание кислорода и азота в МПК практически не зависит от режимов распыления и определяется в основном химическим составом исходной заготовки под распыление. Анализ газовых примесей в порошке показал присутствие кислорода в количестве 0,023% (по массе), а азота – в количестве 0,0041% (по массе). Полученные данные свидетельствуют о высокой точности воспроизведения химического состава МПК из сплава марки ВСДП-3 как качественно, так и количественно. При этом содержание газовых примесей незначительно, в процессе распыления не происходит дополнительного окисления порошка.

Микроструктура порошка ВСДП-3 изображена на рис. 2 и представлена отдельными частицами сферической формы, гомогенно распределенными между собой. При этом различимы частицы размером порядка 10, 20–25 и 40–50 мкм. Для частиц характерно незначительное количество сателлитов, что, очевидно, связано с высокой температурой стеклования данного сплава и, как следствие, с непродолжительной кристаллизацией частиц. Количество дефектных частиц (сателлитов, деформированных гранул и т. п.) возрастает с увеличением размера частиц порошка.

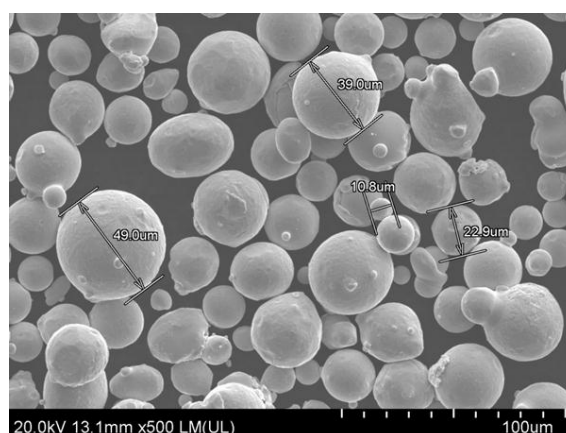


Рис. 2. Микроструктура металлопорошковой композиции из сплава марки ВСДП-3

В работе проведены металлографические исследования образцов из сплава Х20Н80 с теплозащитными покрытиями (ТЗП), полученными атмосферно-плазменным напылением систем покрытий Amdry 962+(Metco 204C-XCL) и ВСДП-3+(ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (рис. 3).

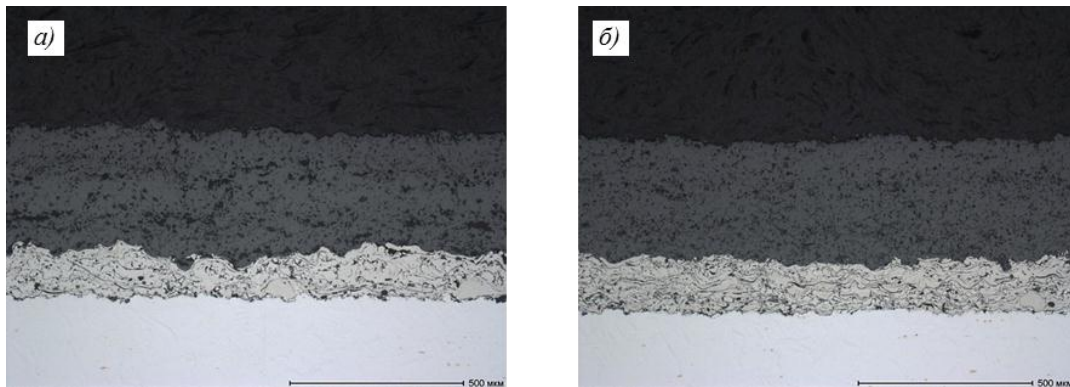


Рис. 3. Микроструктура теплозащитных покрытий, полученных напылением покрытий Amdry 962+(Metco 204C-XCL) (а) и ВСДП-3+(ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (б)

Оба покрытия имеют многослойное строение. Толщина жаростойких слоев покрытия, полученных напылением порошков Amdry 962 (рис. 3, а) и ВСДП-3 (рис. 3, б), составляет 100–150 мкм; толщина керамических слоев покрытия, полученных напылением керамических порошков Metco 204C-XCL (рис. 3, а) и ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 3, б), – порядка 340–400 мкм. Покрытия обладают пористостью, приемлемой для атмосферно-плазменных слоев ТЗП.

Результаты сравнительных структурных исследований теплозащитных покрытий продемонстрировали, что отечественные порошковые материалы позволяют наносить более равномерный по толщине жаростойкий соединительный слой (средний разброс толщины покрытий – порядка 3–5%) по сравнению с покрытиями, полученными с использованием импортных аналогов МПК (средний разброс – до 10%). Следует отметить, что более высокая равномерность покрытий, полученных с использованием отечественных материалов, объясняется применением при напылении более узкой фракции МПК и отсутствием нецелевых фракций.

### Заключения

Для замены импортных порошковых материалов, широко применяемых в отечественном и зарубежном газотурбостроении, под марками СДП/ВСДП во ФГУП «ВИАМ» освоено экспериментальное производство МПК для атмосферно-плазменного напыления жаростойких покрытий. Полученные МПК являются уникальными материалами нового поколения, содержащими в своем составе такие элементы, как рений и гафний, и превосходящими зарубежные аналоги.

Установлено, что химический состав полученных МПК на основе сплавов СДП/ВСДП близок к химическому составу исходных заготовок, предназначенных для распыления, а также к составу литых трубных катодов из сплавов соответствующих марок с погрешностью не более 1–5%. Технология газотермического осаждения позволит получать покрытия, близкие по химическому составу к ионно-плазменным покрытиям [15], получаемым вакуумным распылением катодов по вакуумной плазменной технологии высоких энергий на установках типа МАП [16].

Проведены предварительные исследования полученных новых газотермических покрытий на основе МПК. Показано, что они имеют существенно более высокую микропористость, чем широко применяемые в отечественном газотурбостроении

ионно-плазменные покрытия. Очевидно, что APS-покрытие из-за имеющейся микропористости будет уступать ионно-плазменному в жаростойкости. Однако технология атмосферно-плазменного напыления обеспечивает нанесение жаростойких и теплозащитных покрытий на крупногабаритные изделия, например на камеры сгорания ГТД, что не позволяют сделать ионно-плазменные методы ввиду жестких ограничений по размерам обрабатываемых изделий.

#### Библиографический список

1. Будиновский С.А., Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-38-44.
2. Хасуй А. Техника напыления / пер. с яп. С.Л. Масленникова; под ред. В.С. Блохина, Е.В. Мельникова. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
3. Оспенникова О.Г., Евгенов А.Г., Неруш С.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев на никелевой основе применительно к получению высокотехнологичного полуфабриката в виде самоклеящейся ленты на органическом связующем // *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. №5 (50). С. 137–144.
4. Неруш С.В., Евгенов А.Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
5. Куклин А.А., Мичкова Е.С., Буланов В.Я. и др. Технология и экономика порошковой металлургии. М.: Наука, 1989. 223 с.
6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 60–70.
7. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Металлы*. 2007. №5. С. 23–34.
8. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД // *Газотурбинные технологии*. 2001. №2 (12). С. 30–32.
9. Коломыцев П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия. М.: Металлургия, 1979. 272 с.
10. Коломыцев П.Т. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 216 с.
11. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
12. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с.
13. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 97–105.
15. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
16. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А. Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. №2. С. 15–18.