



УДК 669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4

**ПОЛУЧЕНИЕ И ОПРОБОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА ВЫСОКОХРОМИСТОГО
СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ЛАЗЕРНОЙ LMD-НАПЛАВКЕ**

А.Г. Евгенов

кандидат технических наук

С.В. Неруш

С.А. Василенко

Май 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4

А.Г. Евгенов¹, С.В. Неруш¹, С.А. Василенко¹

ПОЛУЧЕНИЕ И ОПРОБОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА ВЫСОКОХРОМИСТОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЛАЗЕРНОЙ LMD-НАПЛАВКЕ

Исследованы мелкодисперсные металлические порошки жаропрочного сплава ЭП648-ВИ для адаптивной лазерной LMD-наплавки, полученные методом атомизации на установке HERMIGA 10/100 VI. Показано, что полученные при распылении холодным и горячим газом мелкодисперсные порошки имеют низкое содержание кислорода, сферическую форму, выраженную дендритную структуру во всем диапазоне гранулометрического состава. Адаптивная лазерная LMD-наплавка с применением металлического порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм по отработке технологии ремонта сектора моноколеса гарантирует высокое качество наплавленного материала (наличие дефектов типа микротрещин, непроваров и пористости не выявлено). Показаны перспективы применения технологии LMD-наплавки.

Ключевые слова: *атомизация, распыление, синтез, наплавка, порошки, гранулы, пористость, гранулометрический состав, аддитивные технологии.*

A.G. Evgenov, S.V. Nerush, S.A. Vasilenko

THE OBTAINING AND TESTING OF THE FINE-DISPERSED METAL POWDER OF THE HIGH-CHROMIUM ALLOY ON NICKEL-BASE FOR LASER METAL DEPOSITION

Fine-dispersed metal powders of the heat resisting alloy brand EP648-VI for laser metal deposition (LMD), obtained by method of atomization at a facility HERMIGA10/100 VI are investigated. It is shown, that the obtained fine-dispersed powders when spraying by cold and hot gas have low oxygen content, the spherical form, the expressed dendritic structure in all range of the granulometric distribution. Adaptive laser metal deposition with application metal powder of the heat resisting alloy EP648-VI of the granulometric distribution 40–80 microns on working off technology of recovery of geometry extreme combs on the bandage shelf of working blades of the second step

guarantees high quality of welding material (availability of defects of typemicrocracks, lack of penetrations is not revealed).

Keywords: *atomization; spraying; synthesis; welding, powders; granules; porosity, granulometric distribution, the additive technologies.*

¹ 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

При эксплуатации в составе авиационного двигателя детали ГТД (в частности лопатки компрессора высокого давления (КВД)) подвергаются абразивному износу, воздействию высоких температур и прочих негативных факторов, которые приводят к образованию трещин и забоин [1–4]. Высокая стоимость большинства деталей авиационного двигателя делает продление их ресурса весьма перспективным направлением. Вследствие отставания отечественных предприятий от компаний западных стран в этой области задача разработки технологии ремонта деталей авиационного двигателя является актуальной. Решение данной проблемы возможно с применением лазерной газопорошковой наплавки – LMD (Laser Metal Deposition) [5]. Этот процесс крайне привлекателен для ремонта важнейших деталей в авиастроении и оснастки, а также для внесения изменений в конфигурацию изделий везде, где применение традиционных технологий может привести к ухудшению свойств основного металла в результате воздействия высоких температур. Ремонт авиационных деталей с помощью LMD-наплавки может быть весьма выгоден, так как изготовление новой детали стандартным способом может оказаться в ~20 раз дороже.

Существует несколько LMD-процессов, но все они основаны на одном принципе: сфокусированный лазерный луч направляется на порошок, подаваемый в виде газопорошковой смеси роботизированным дозирующим устройством, происходит плавление смеси и постепенное создание детали слой за слоем (последовательно). Применение в качестве аддитивного метода LMD позволяет изготавливать детали прямо из геометрической CAD модели. Это увеличивает коэффициент использования материалов по сравнению с традиционными методами изготовления (в частности, уменьшается механическая обработка сложных деталей), а также создает возможность получения детали с пористой или плотной структурой; происходит экономия времени за счет сокращения количества технологических операций.

В дополнение к изготовлению высококачественных, точных деталей и быстрому прототипированию наблюдаются положительные результаты при использовании LMD-наплавки для местного ремонта деталей. Возможно восстановление сложнопрофильных деталей, так как локальный характер нагрева обеспечивает малую зону термического влияния. Это не вызывает значительного снижения прочности, а деформации (коробление, поводки) при этом ниже, чем при традиционной сварке. Наплавка LMD особенно целесообразна для сложных деталей малых и средних размеров. Наиболее успешное применение данная технология нашла в медицине и стоматологии – для слуховых аппаратов, ортопедических имплантатов и зубных протезов. Перспективными областями применения являются нефте- и газодобывающая промышленность, автомобилестроение, изделия морской техники и ювелирные изделия.

Очень трудно спрогнозировать свойства детали, выполненной с помощью LMD-наплавки, так как в процесс вовлечено много переменных. Для достижения постоянных свойств наплавленных деталей требуется знание и понимание изменений микроструктуры и свойств материала, а также необходимы данные о свойствах исходного материала [6].

В качестве исходного материала для LMD-наплавки применяются мелкодисперсные металлические порошки сплавов на различной основе. К металлическим порошкам для данной технологии предъявляются жесткие требования. В первую очередь это обеспечение сферичности частиц строго определенного гранулометрического состава (40–80 мкм), высокая химическая однородность, отсутствие пористых гранул, пониженное содержание газовых примесей – кислорода и азота.

В мировой практике разработаны два основных промышленных способа производства металлических порошков:

- газовое (газоструйное) распыление расплава, заключающееся в механическом воздействии инертного газа (чаще всего аргона) повышенного давления на струю жидкого металла;

- центробежное распыление тонкой пленки расплава, образующейся под воздействием плазменной струи на торце быстровращающейся цилиндрической заготовки.

Обе технологии позволяют получать металлические порошки сферической формы, однако наибольшее распространение получили установки газоструйного распыления, так как в случае центробежного распыления имеется ряд недостатков – это неоднородность получаемых порошков по химическому составу, связанная с ликвацией в самом

распыляемом электроде, большой разброс по дисперсности (50–600 мкм) с крайне низким выходом годного (5–7%) по фракции 40–80 мкм [7].

Получение высококачественных металлических порошков с высоким выходом годного может быть обеспечено при изготовлении на современном оборудовании методом атомизации – распылением расплава инертным газом [8]. В ВИАМ в 2010 г. введен в эксплуатацию современный атомайзер последнего поколения HERMIGA 10/100 VI, имеющий основной рабочий диапазон получаемых гранул 10–200 мкм, ориентированный на мелкосерийное производство мелкодисперсных металлических порошков для аддитивных технологий, в частности – для лазерной LMD-наплавки. При распылении в атомайзере разливка металла осуществляется через подогреваемую керамическую трубку диаметром от 1 до 2 мм при давлении распыления от 3 до 7 МПа. Предусмотрена также система подогрева газа, которая за счет увеличения начальной скорости распыляющего газа на выходе из сверхзвуковой форсунки типа сопла Лавалья до 2 Ма обеспечивает получение ультрадисперсных частиц порошка.

Данная работа посвящена исследованию мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе, изготовленного методом атомизации, для лазерной LMD-наплавки, а именно – гранулометрического состава, содержания газовых примесей, микроструктуры поверхности частиц порошка, наличия пористых гранул.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран жаропрочный сплав на никелевой основе марки ЭП648-ВИ. Порошок получали методом атомизации на установке HERMIGA 10/100 VI, оснащенной индукционным плавильным блоком с донным сливом. Исходную шихтовую заготовку для процесса атомизации выплавляли в вакуумной плавильной установке УППФ-3М с использованием специальной разливочной оснастки для получения электродов $\varnothing 30$ мм [9]. Поверхность исходной заготовки предварительно подвергали пескоструйной обработке. Распыление жидкого металла вели холодным и подогретым газом с использованием дозвукового и сверхзвукового сопла форсунки.

Для получения мелкодисперсного металлического порошка сплава ЭП648-ВИ проводили процесс атомизации по трем режимам. Диаметр проходного сечения подогреваемой керамической трубки, температуру жидкого металла и избыточное давление над расплавом выбирали постоянными, остальные параметры варьировали в определенном диапазоне.

Гранулометрический состав полученного порошка определяли 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 массы, имеющего рабочий диапазон от 1 до 70 мкм. Анализ газовых примесей в порошке проводили на газоанализаторах фирмы Лесо (CS0600 и ТС-600) без предварительной дегазации полученных порошков. Для исследования пористости гранулы порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ, полученные распылением, разбивали на фракции 40–80, 80–100, 100–200 мкм и после запрессовки в обоймы изготавливали шлифы поперечного среза. Для отделения пористых гранул специально проводили газодинамическую (циклоническую) сепарацию в штатном классификаторе, принцип разделения в котором основан не на размере гранул, а на их массе, которая для пористых гранул всегда меньше, чем для плотных. Эффективность сепарации оценивали на шлифах поперечных срезов гранул.

Микроструктуру поверхности гранул и поперечных срезов шлифов гранул, а также наплавленных дорожек исследовали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840.

Экспериментальную LMD-наплавку проводили на поверхность плоского листа при помощи специализированного оборудования TruLaser Cell 7020 в ОАО «Авиадвигатель».

Результаты и обсуждение

Исследован фракционный состав порошков, полученных при различных значениях давления распыляющего газа и расходе металла. Кумулятивные кривые, отражающие фракционный состав порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ, представлены на рис. 1. Основными факторами, влияющими на фракционный состав получаемых порошков, являются давление и температура распыляющего газа [10]. Основная фракция при распылении холодным газом: 40–80 мкм. При переходе на распыление горячим газом уменьшение среднего диаметра частиц происходит главным образом за счет фракции 40–20 мкм (ее содержание увеличивается с 7,8 до 33,3%), а содержание фракции 40–80 мкм уменьшается с 39,4 до 24,9%. Процент пылевой фракции (менее 10 мкм) при распылении горячим газом увеличивается незначительно. При распылении холодным газом средний диаметр частиц d_{50} (50% получаемого порошка) составляет 76–66 мкм, а распыление горячим газом позволяет получить d_{50} , равный 34 мкм.

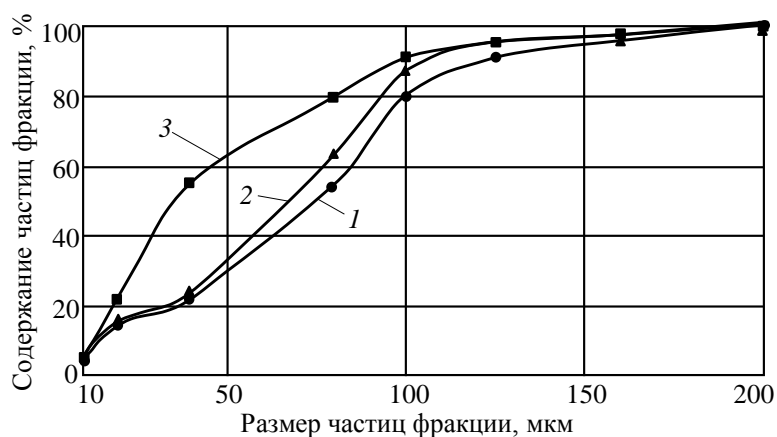


Рисунок 1. Фракционный состав порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ при распылении холодным (1, 2) и горячим газом (3)

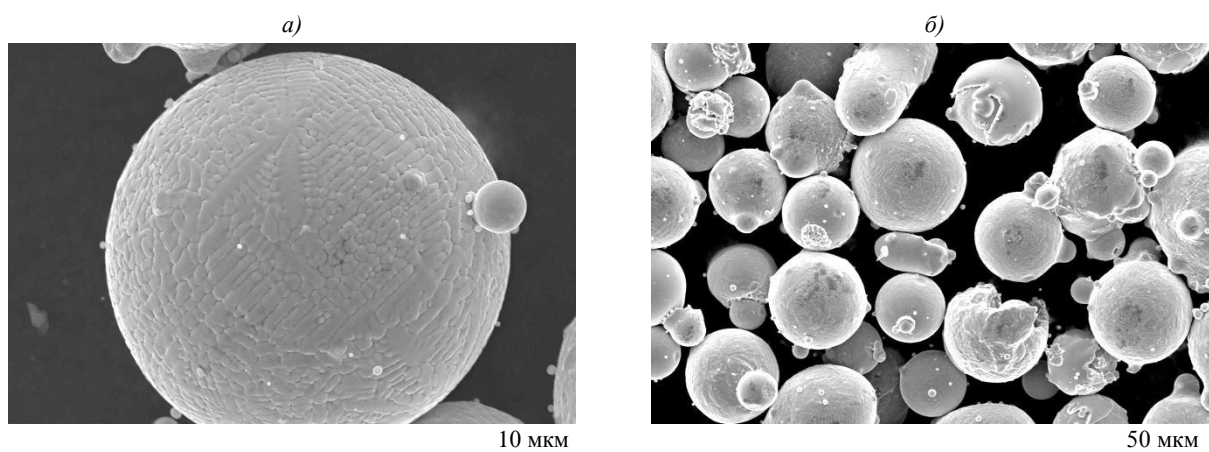
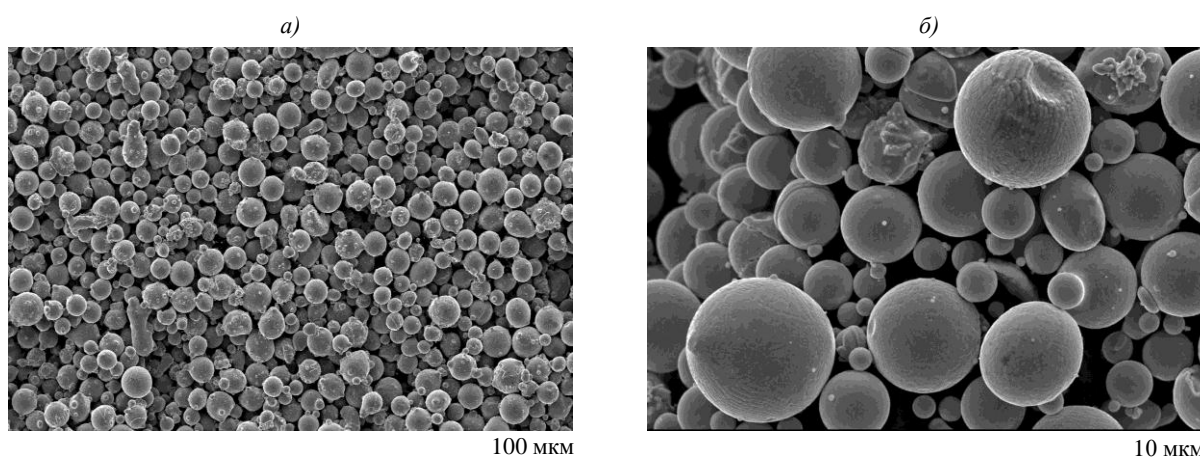


Рисунок 2. Микроструктура (а – $\times 1500$; б – $\times 500$) поверхности гранул порошка сплава ЭП648-ВИ

Исследование структуры поверхности гранул сплава ЭП648-ВИ показало, что все гранулы имеют выраженную дендритную структуру во всем диапазоне гранулометрического состава и сферическую форму (рис. 2, а), однако для них характерно большое количество образующихся дефектов – сателлитов (рис. 2, б). Сателлиты являются наиболее характерным и неизбежным дефектом гранул подобных жаропрочных материалов, получаемых распылением жидкого металла потоком инертного газа. В отличие от центробежного распыления, где разлет гранул происходит на 360 град, формирующийся факел при распылении аргоном направлен вдоль оси колонны атомизации для обеспечения максимального «вылета» гранул без контакта со стенками для сохранения сферичности. В таких условиях формирование сателлитов неизбежно, поскольку энергия газового потока передается частицам в соответствии с их массой: наиболее дисперсные гранулы, приобретают большую начальную скорость и, мгновенно кристалли-

зуюсь, бомбардируют более крупные, частично кристаллизованные гранулы, имеющие меньшую начальную скорость. Количество дефектных гранул увеличивается с увеличением размеров частиц. При исследовании порошков припоев [11–13] также отмечалось большое количество сателлитов именно для наиболее высокотемпературных припоев, таких как ВПр36 и ВПр44, представляющих собой, по сути, также жаропрочные сплавы, дополнительно легированные кремнием и бором.

Распыление горячим газом приводит, помимо уменьшения среднего размера частиц, к уменьшению количества дефектных гранул (рис. 3, б) по сравнению с распылением холодным газом (рис. 3, а), что связано с большей начальной скоростью газового потока на выходе из форсунки и бóльшим диаметром образующегося факела распыляемого жидкого металла, что определяет более низкую вероятность соударения гранул во время кристаллизации. Существенных различий в структуре поверхности между гранулами, распыленными холодным и горячим газом, не отмечено: чистота поверхности, форма, дендритный параметр гранул остаются без изменений.



Рисунки 3. Микроструктура гранул порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ при распылении холодным (а – $\times 100$) и горячим газом (б – $\times 1000$)

При применении металлических порошков в лазерной LMD-наплавке наличие сателлитов не имеет практического значения. Большое влияние на качество наплавки оказывает внутренняя пористость в гранулах, полученных при распылении аргоном. Согласно литературным данным [14, 15] пористость в гранулах, полученных распылением расплава потоком аргона, является неизбежным следствием технологии их получения: при дроблении струи жидкого металла потоком аргона фрагменты расплава под действием сил поверхностного натяжения формируют капли сферической формы, но в процессе схлопывания стенок капли локальный объем аргона может быть изолирован

внутри гранулы. По данным работы [16], объемная доля пористости при распылении через форсунку с дозвуковым соплом (как и в данной работе при получении порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ с распылением холодным газом) при давлении распыления 0,4–0,5 МПа составляет ~1%. В данной работе давление распыления было практически на порядок выше, чем в работе [17], из-за чего проводили полное исследование пористости гранул во всем интервале гранулометрического состава порошка. Исследование шлифов поперечных срезов гранул, предварительно разбитых на фракции 40–80, 80–100 и 100–200 мкм, показало, что тонкие порошки (менее 40 мкм) имеют плотную структуру, а «порогом» появления пористых гранул является величина ~60 мкм. В более крупных фракциях встречаются частицы, пораженные замкнутой пористостью, и их количество увеличивается с размерами гранул.

Эффективность отработанного режима газодинамической сепарации пористых гранул подтверждена исследованием микроструктуры поперечных шлифов, которое показало, что в отсеке при оптимальных режимах сепарации (в так называемых «легких» гранулах) содержалось ~50% пораженных пористостью гранул (рис. 4, *а*). При исследовании отделенных (так называемых «тяжелых») частиц порошка пористых гранул не обнаружено (рис. 4, *б*).

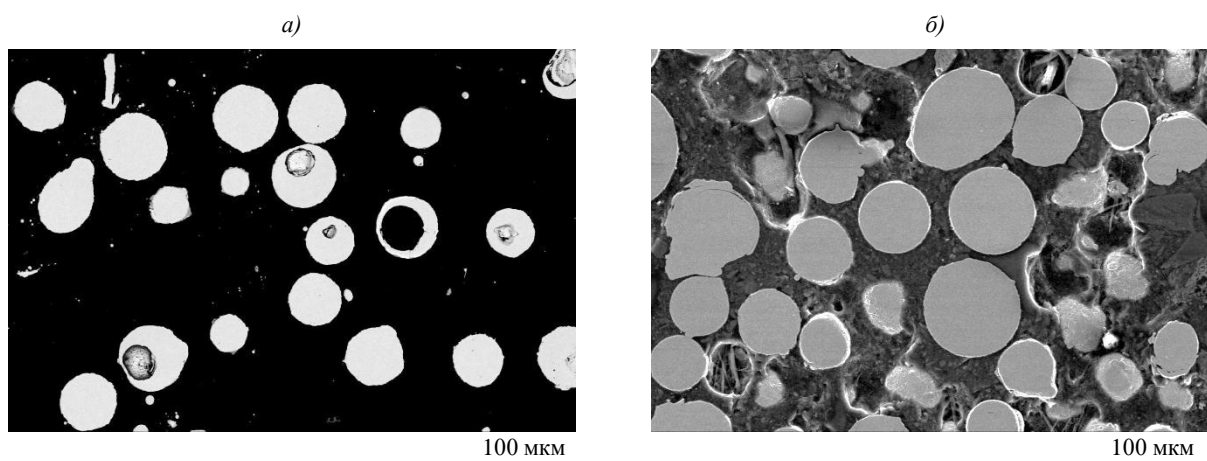


Рисунок 4. Микроструктура поперечных срезов «легких» (*а* – $\times 150$) и «тяжелых» гранул (*б* – $\times 250$) порошков жаропрочного сплава ЭП648-ВИ после газодинамической сепарации в классификаторе

Исследование влияния фракционного состава на содержание кислорода в порошках показало, что в диапазоне фракции размером 40–200 мкм оно изменяется незначительно (от 0,005–0,007% – для фракции 200–63 мкм до 0,008–0,009% – для фракции 40–63 мкм). Для фракции 40–0 мкм содержание кислорода составляет ~0,02%. В целом на порошках жаропрочного сплава ЭП648-ВИ, в том числе и на тонких, получено достаточно

низкое содержание кислорода, что обусловлено технологией получения – распылением расплава не на открытом воздухе, а в атмосфере инертного аргона, а также, по сути, двойным вакуумным переплавом (выплавка шихтовой заготовки и собственно расплавление в процессе атомизации).

Адаптивная лазерная LMD-наплавка

Мелкодисперсный металлический порошок жаропрочного сплава ЭП648-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм применен при отработке технологии лазерной наплавки методом LMD на лазерном центре TruLaser Cell 7020 в ОАО «Авиадвигатель». В качестве объекта исследования использовались лопатки сектора моноколеса, которые предварительно подготовлены с помощью фрезерования (рис. 5). В результате контроля наплавленного металла на входной кромке сектора моноколеса установлено, что между основным материалом и материалом наплавки имеется четкая граница раздела, на которой дефектов типа трещин, непроваров и пористости не выявлено, что свидетельствует о высоком качестве порошкового материала. Материал наплавки плотный, микроструктура имеет мелкоигольчатое строение, что связано с интенсивным теплоотводом в процессе охлаждения во время LMD-наплавки.

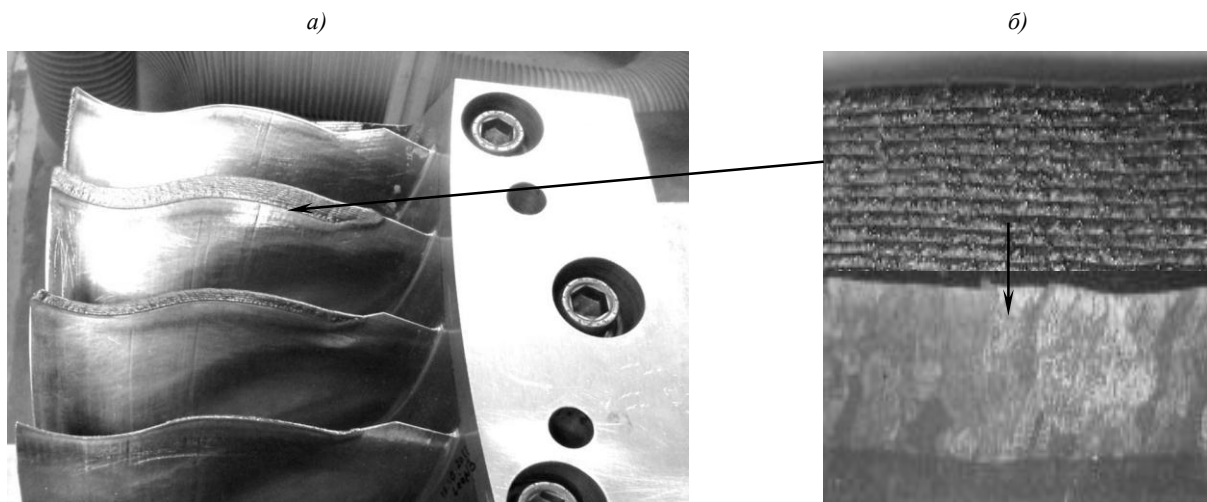


Рисунок 5. Входная кромка лопатки сектора моноколеса после адаптивной наплавки (а) и микроструктура наплавленного материала (б)

Перспективы развития LMD-наплавки

Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения LMD-наплавки и металлических порошков отечественного производства для ремонта деталей ГТД – в особенности для лопаток из дорогостоящих ренийсодержащих сплавов

[18, 19]. Подобные технологии требуются и для ремонта деталей ГТД из титановых сплавов. Однако, если работы непосредственно по наплавке титановых порошков можно производить на том же оборудовании (в частности – на лазерном центре TruLaser Cell 7020), то основным сдерживающим фактором для работ в данном направлении является отсутствие в стране производства порошков титановых сплавов. Получение порошков высокоактивных металлов (титана, циркония и т. п.) на тигельных атомайзерах невозможно как из-за высоких температур плавления, так и из-за химической реакции с большинством применяемых огнеупорных футеровок. Для получения качественных порошков на основе титана необходимо приобретение современного атомайзера с бес-тигельной плавкой электрода. Процесс получения порошков на подобном оборудовании полностью исключает контакт расплава с керамикой (графитом) в процессе распыливания и обеспечивает решение еще одной важной проблемы – наличия керамических включений в получаемых порошках.

Наиболее передовым в данной области является оборудование фирмы ALD – атомайзер EIGA 50/500 (рис. 6), предназначенный для получения порошков сплавов на основе титана, циркония, никеля, железа при плавлении электрода ($\varnothing 50 \times 500$ мм) и распылинии свободно падающей капли. Такая схема получения порошка позволяет значительно увеличить производительность (по сравнению с периодическими машинами), а отсутствие расходных керамических и графитовых частей значительно удешевляет производство порошков. Расход же газа на 1 кг получаемого порошка сопоставим с большими тигельными атомайзерами. Стабильность процесса на таком оборудовании несколько выше, чем на тигельных атомайзерах, так как отсутствует стадия «первой порции» металла, распыливание которой, как правило, загрязняет порошок скрапом и окисленными крупными гранулами. В данном случае подача металла на всех этапах распыливания идет одинаково, а поток аргона в форсунке формируется до начала плавления электрода. По данным фирмы ALD (рис. 7), выход годного порошка с размером фракции 40–80 мкм составляет для титановых сплавов порядка 33–35%, а для нержавеющей стали – до 40%, что является весьма высоким показателем по сравнению с другими технологиями распыливания.

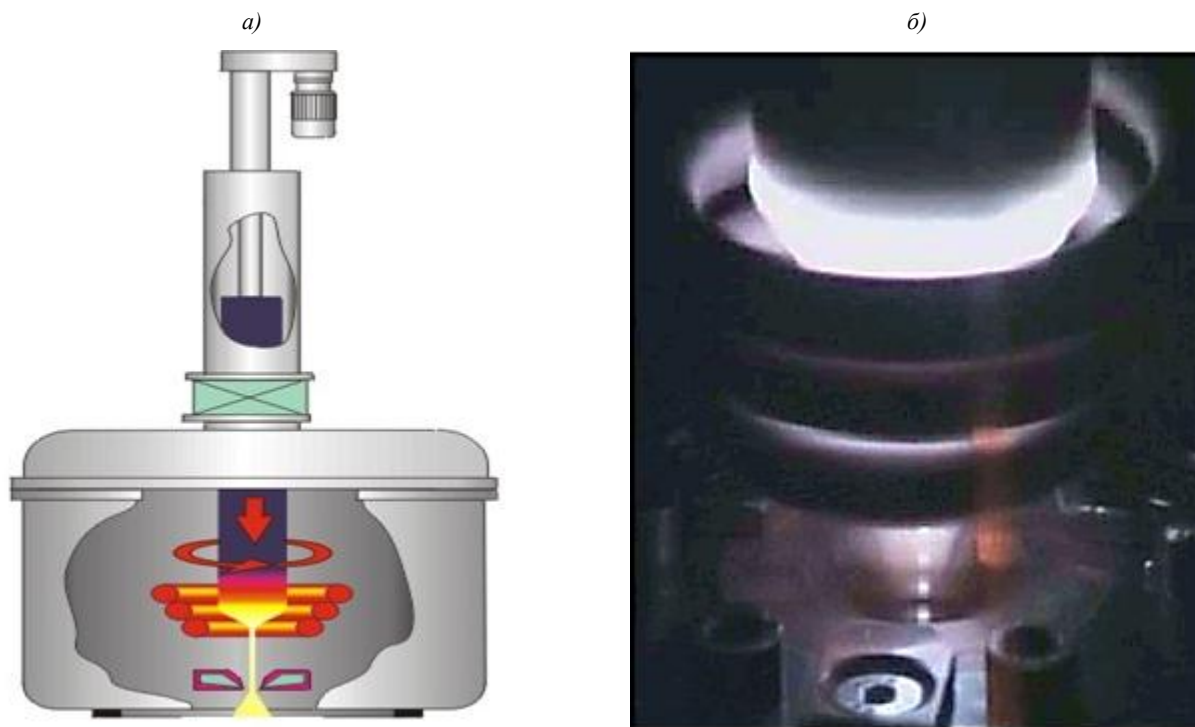


Рисунок 6. Схема бестигельного атомайзера EIGA 50/500 фирмы ALD для получения порошков высокоактивных сплавов

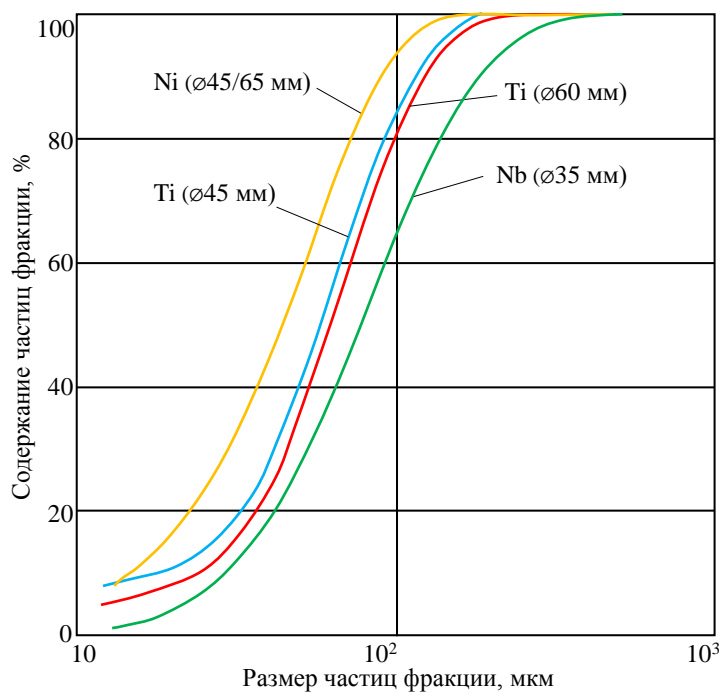


Рисунок 7. Распределение порошков сплавов на основе никеля, титана и ниобия, полученных методом атомизации на атомайзере EIGA 50/500 фирмы ALD, в зависимости от диаметра расходуемого электрода

Заключение

Показано, что метод атомизации расплава позволяет получать пригодные для лазерной LMD-наплавки мелкодисперсные металлические порошки жаропрочного сплава ЭП648-ВИ с гранулометрическим составом 40–80 мкм при распылении холодным и горячим газом с высоким выходом годного: 30–40% (по сравнению с существующими технологиями получения металлических порошков в РФ).

Распыление подогретым до 450°C газом способствует значительному измельчению порошков и уменьшает количество образующихся дефектных гранул – сателлитов (по сравнению с распылением холодным газом). Уменьшение среднего размера частиц при переходе на распыление горячим газом происходит за счет увеличения гранул фракции 20–20 мкм, а количество пылевой фракции (менее 10 мкм) увеличивается незначительно. Содержание кислорода в порошках жаропрочного сплава находится в интервале от 0,007 до 0,01% и не превышает 0,02% даже для частиц размером <10 мкм.

Адаптивная лазерная LMD-наплавка, выполненная с применением металлического порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм при отработке технологии ремонта сектора моноколеса, имеет высокий уровень качества. Установлено, что между основным материалом и материалом наплавки имеется четкая граница раздела, на границе раздела дефектов типа трещин, непроваров, пористости не выявлено, что свидетельствует о высоком качестве порошкового материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
2. Герасимов Д.Е., Разуваев Е.В. Производство деформированных полуфабрикатов из современных и перспективных жаропрочных никелевых сплавов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Технология производства авиационных металлических материалов». М.: ВИАМ. 2002. С. 125–132.
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 52–57.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).

5. Неруш С.В., Евгенов А.Г. Производство порошков припоев и готовых полуфабрикатов на их основе, а также порошков жаропрочных сплавов и сталей для аддитивных технологий /В сб. докл. науч.-технич. конгресса по двигателестроению (НТКД-2012). 2012. С. 344–347.
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
7. Лыков П.А., Сафонов Е.В., Бромер К.А., Шульц А.О. Получение металлических микропорошков газодинамическим распылением //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Машиностроение». 2012. Вып. 33. С. 107–112.
8. Евгенов А.Г., Неруш С.В. Технология получения порошков и полуфабрикатов припоев, исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава /В сб. материалов V Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов. Уфа: УМПО. 2011. С. 159–162.
9. 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.
10. Лыков П.А., Бромер К.А., Рощин В.Е., Брындин С.А. Определение технологических параметров получения металлических ультрадисперсных порошков //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Металлургия». 2011. Вып. 14. С. 17–19.
11. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 79–87.
12. 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 самоклеющейся ленты на органическом связующем //Вестник УГАТУ. 2012. №5 (50). С. 137–144.
13. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и технологических покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.

14. Лыков П.А., Рощин В.Е., Воробьев Е.И. Влияние технологических параметров распыления металлических расплавов на гранулометрический состав порошка и форму частиц порошка //Известия вузов. Сер. «Черная металлургия». 2012. №6. С. 21–23.
15. Берсенев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул //Вестник МАИ. 2008. Т. 15. №3. С. 83–89.
16. Сафронов В.П., Рытов Н.Н., Эскин Г.И., Солуянов Ю.Ф. Совершенствование технологии газоструйного распыления расплава /В сб. статей «Металлургия гранул». Вып. 1. М.: ВИЛС. 1983. С. 59–63.
17. Анучин П.С., Щербаков А.И., Калицев В.А. и др. Особенности производства жаропрочных порошковых припоев /В сб. статей «Металлургия гранул». Вып. 1. М.: ВИЛС. 1983. С. 154–159.
18. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Бронфин М.Б., Алексеев А.А. Особенности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением //Металлы. 2006. №5. С. 47–57.
19. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. II //Материаловедение. 1997. №5. С. 14–16.

REFERENCES LIST

1. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Novye materialy dlja perspektivnogo dvigatelja OAO «NPO „Saturn”» [New materials for advanced engine JSC «NPO „Saturn”»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 6–8.
2. Gerasimov D.E., Razuvaev E.V. Proizvodstvo deformirovannyh polufabrikatov iz sovremennyh i perspektivnyh zharoprochnykh nikelovyh splavov [Production of semi-finished deformed modern and advanced heat-resistant nickel alloys] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Tehnologija proizvodstva aviacionnyh metallicheskih materialov». M.: VIAM. 2002. S. 125–132.
3. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovye splavy dlja detalej gazoturbinyh dvigatelej [High-temperature heat-resistant nickel alloys for turbine engine parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 52–57.

4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements - materials of current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
5. Nerush S.V., Evgenov A.G. Proizvodstvo poroshkov pripoev i gotovyh polufabri-katov na ih osnove, a takzhe poroshkov zharoprochnyh splavov i stalej dlja additivnyh tehnologij [Manufacture of solder powder and semi-finished on their basis, as well as powders heat-resistant alloys and steels for additive technologies] /V sb. dokl. nauch.-tehnich. kongressa po dvigatelestroeniju (NTKD-2012). 2012. S. 344–347.
6. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
7. Lykov P.A., Safonov E.V., Bromer K.A., Shul'c A.O. Poluchenie metallicheskih mikro-poroshkov gazodinamicheskim raspyleniem [Preparation of metal spray micropowders gasdynamic] //Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Mashinostroenie». 2012. Vyp. 33. S. 107–112.
8. Evgenov A.G., Nerush S.V. Tehnologija poluchenija poroshkov i polufabrikatov pripoev, issledovanie melkdispersnyh poroshkov pripoev dlja diffuzionnoj vakuumnoj pajki, poluchennyh metodom atomizacii rasplava [Technology for producing powders and semi solders study of fine powders of alloys, diffusion vacuum brazing, obtained by atomization of the melt] /V sb. materialov V Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh specialistov. Ufa: UMPO. 2011. S. 159–162.
9. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovyh zagotovok iz litejnyh zharoprochnyh splavov novogo pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.
10. Lykov P.A., Bromer K.A., Roshhin V.E., Bryndin S.A. Opredelenie tehnologicheskikh parametrov poluchenija metallicheskih ul'tradispersnyh poroshkov [Determination of process parameters for producing a metallic ultrafine powders] //Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Metallurgija». 2011. Vyp. 14. S. 17–19.
11. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N. Issledovanie melkdispersnyh poroshkov pripoev dlja diffuzionnoj vakuumnoj pajki, poluchennyh metodom avtomizacii rasplava [Investigation of fine powders of alloys, diffusion vacu-

- um brazing obtained by melt avtomizatsii] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 79–87.
12. Ospennikova O.G., Evgenov A.G., Nerush S.V., Afanas'ev-Hodykin A.N. Issledovanie melkodispersnyh poroshkov pripoev na nikelевой osnove primenitel'no k polucheniju vysokotehnologichnogo polufabrikata v vide samoklejushhejsja lenty na organicheskom svjazujushhem [Investigation of fine solder powder nickel-based high-tech applied to obtain a semi-adhesive tape on the organic binder] //Vestnik UGATU. 2012. №5 (50). S. 137–144.
 13. Ospennikova O.G. Strategija razvitija zharoprochnyh splavov i stalej special'nogo naznachenija, zashhitnyh i tehnologicheskikh pokrytij [The development strategy of superalloys and special steel, protective coatings and technological] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 19–36.
 14. Lykov P.A., Roshhin V.E., Vorob'ev E.I. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov raspyl'enija metallicheskih rasplavov na granulometricheskij sostav poroshka i formu chastic poroshka [Effect of process parameters on the melt spraying of metal powder particle size distribution and shape of the powder particles] //Izvestija vuzov. Ser. «Chernaja metallurgija». 2012. №6. S. 21–23.
 15. Bersenev A.G., Logunov A.V., Logacheva A.I. Problemy povyshenija kachestva zharoprochnyh splavov, poluchaemyh metodom metallurgii granul [Problems of improving the quality of high-temperature alloys, obtained by granule metallurgy] //Vestnik MAI. 2008. T. 15. №3. S. 83–89.
 16. Safronov V.P., Rytov N.N., Jeskin G.I., Solujanov Ju.F. Sovershenstvovanie tehnologii gazostrujnogo raspyl'enija rasplava [Improving technology gas-jet spray melt] /V sb. statej «Metallurgija granul». Vyp. 1. M.: VILS. 1983. S. 59–63.
 17. Anuchin P.S., Shherbakov A.I., Kalicev V.A. i dr. Osobennosti proizvodstva zharoprochnyh poroshkovykh pripoev [Features production of heat-resistant powder solders] /V sb. statej «Metallurgija granul». Vyp. 1. M.: VILS. 1983. S. 154–159.
 18. Kablov E.N., Petrushin N.V., Bronfin M.B., Alekseev A.A. Osobennosti monokristallicheskih zharoprochnyh nikel'evyh splavov, legirovannyh reniem [Features single-crystal high-temperature nickel alloys alloyed with rhenium] //Metally. 2006. №5. S. 47–57.
 19. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy dlja lit'ja lopatok s napravlennoj i monokristallicheskoj strukturoj [Nickel superalloys for blades casting with directional and single-crystal structure]. Ch. II //Materialovedenie. 1997. №5. S. 14–16.