

УДК 621.762:669.018.44

А.Г. Евгенов¹, С.И. Щербаков², А.М. Роголев¹**ОПРОБОВАНИЕ ПОРОШКОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ
ЭП718 И ЭП648 ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ВИАМ»
ДЛЯ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ГТД МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ
ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-16-23

Рассмотрены аспекты применения отечественных металлических порошков сплавов ЭП718 и ЭП648 для восстановления геометрической формы деталей ГТД лазерной газопорошковой наплавкой. Исследованы морфология частиц и фракционный состав примененных порошковых материалов. Исследовано влияние основных параметров наплавки на геометрическую форму наплавляемого материала. Рассмотрены особенности формирования структуры наплавленного материала, изменения микротвердости по высоте наплавки и основного материала. Показано, что отработанные оптимальные режимы наплавки обеспечивают получение плотной структуры дендритного строения без трещин, пор, непролагов.

Ключевые слова: лазерная газопорошковая наплавка, металлопорошковая композиция, защитная среда, дендритная структура, ячеистая структура, микротвердость, наплавленный материал.

Application aspects of domestic EP718 and EP648 alloys powders to restore the geometry of laser gas turbine engine parts by braze are discussed in the article. The morphology of the particles and the fractional composition of applied powder materials are investigated. Influence of key parameters of braze on geometry of the built-up material are investigated. The features of structure formation of deposited material, change of microhardness on the fusing height and base material are considered. It is shown that the optimal practiced fusing modes provide with dense dendritic structure without cracks, pores, opalescences.

Keywords: laser gas powder braze, metal-powder composition, protective environment, dendritic structure, cellular structure, micro-hardness, the braze material.

¹Федеральное 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

²Акционерное общество «Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют» [Open Joint Stock Company «Salyut gas turbine engineering research and production center»]; e-mail: info@salut.ru

Введение

Надежностью работы лопаток компрессора и турбины – наиболее нагруженных деталей – во многом определяется надежность газотурбинных двигателей в целом. Лопатки подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок, кроме того, лопатки турбины испытывают циклические, термические напряжения, они работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре и подвергаются газовой коррозии.

Повреждения лопаток компрессора ГТД в процессе эксплуатации и изготовления приводят к досрочному снятию большого числа двигателей. Причинами повреждения лопаток при эксплуатации являются засасывание с поверхности аэродрома посторонних предметов, попадание птиц, камней. При эксплуатации лопаток турбин происходит износ торца пера лопаток и наблюдается падение коэффициента компрессии, что приводит к выводу агрегата из эксплуатации.

Задача разработки технологии восстановления

поврежденных лопаток и других деталей авиационного двигателя является на данный момент крайне актуальной. Сложность восстановительного ремонта поврежденных лопаток в том, что расположение, размер и форма сколов в каждом конкретном случае уникальна. Поэтому каждый случай восстановительного ремонта лопатки требует индивидуального подхода.

Одним из наиболее эффективных методов исправления полученных при эксплуатации или связанных с производством дефектов, позволяющим восстанавливать профиль поверхности, входных и выходных кромок лопаток, геометрическую форму контактных полок, устранять термические трещины, является лазерная наплавка, в том числе адаптивная, включающая нанесение материала по предварительно разработанной 3D-модели, – одна из интенсивно развивающихся аддитивных технологий. Лазерной наплавке, как в части ремонта, так и в части выращивания заготовок деталей, посвящен большой объем публикаций [1–5], однако в основном они касаются работы с импортными

ми порошковыми материалами. В данной работе рассмотрено применение для лазерной наплавки отечественных жаропрочных сплавов.

В настоящее время аддитивные технологии находятся в фазе бурного роста. Оборот мирового рынка аддитивных технологий увеличивается в среднем более чем на 27% в год. Интенсивный рост рынка объясняется преимуществами аддитивных технологий по сравнению с традиционными формообразующими технологиями. Это возможность изготовления деталей практически любой сложности, высокие свойства синтезированного материала, а также сокращение сроков разработки и изготовления деталей за счет отсутствия фазы подготовки производства – при необходимости возможно сразу организовать локальное производство необходимых деталей в мировых масштабах (в любой географической точке), просто передав цифровую модель. Таким образом, внедрение аддитивных технологий внесет значительный вклад в создание «умной» экономики и будет способствовать к переходу в шестой технологический уклад [6–8].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.4. «Технологии получения би- и полиметаллических естественноармированных металлических материалов методом прямого лазерного синтеза из металлических порошков» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9].

Методика проведения исследований

В качестве материала для исследования выбраны жаропрочные никелевые деформируемые сплавы марок ЭП718 и ЭП648 (ВХ4А). Из заготовок данных сплавов получали порошок методом атомизации (распыления расплава потоком аргона) на установке HERMIGA 10/100 VI фирмы PSI. Рассев порошка на фракции осуществляли в промышленном виброгрохоте ConceptLaser QM Powder. Исследование фракционного состава полученных порошков проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analizette 22 фирмы Fritsch. Для технологии лазерной наплавки гранулометрический состав порошка находился в диапазоне 50–80 мкм.

Микроструктуру наплавленных покрытий исследовали с помощью оптического металлографического микроскопа Neophot-30 производства фирмы Carl Zeiss Jena (Германия) с увеличением до $\times 500$.

Для выявления микроструктуры наплавленных покрытий образцы подвергали химическому травлению. Для травления использовали раствор состава: 5 мл HF+5 мл HNO₃+25 мл C₂H₅OH. Время травления составляло ~2 с.

С целью изучения топографии поверхности микрошлифов наплавленных покрытий образцы исследовали с помощью растрового электронного

микроскопа марки EVO 50 производства фирмы Carl Zeiss (Германия).

Гарантированное разрешение прибора составляет 3 нм при использовании катода из гексаборида лантана (LaB₆). Ускоряющее напряжение – до 30 кВ, вакуум в колонне – не ниже 10⁻⁷ Па. Изображение получали во вторичных и отраженных электронах с помощью детекторов:

- вторичных электронов марки Everhardt-Thornley;
- четырехквadrантного детектора отраженных электронов марки 4Q-BSD.

Определение элементного состава образцов проводили методами рентгеновского микроанализа в аналитическом растровом электронном микроскопе EVO-50 при ускоряющем напряжении 10–20 кВ (ток зонда 5–50 нА) с помощью:

- энергодисперсионного спектрометра INCA x-ACT с разрешением 133 эВ производства фирмы Oxford Instruments (Великобритания);
- волнового спектрометра INCA Wave-500 с разрешением 5 эВ и чувствительностью 0,01% (по массе) производства фирмы Oxford Instruments (Великобритания).

Глубина анализируемого слоя составляла ~1 мкм.

Микротвердость образцов измеряли по методу Виккерса на приборе HVS-1000 (Китай) с автоматическим нагружением индентора при величине нагрузки $P=1$ Н. Время выдержки под нагрузкой составляло 20 с.

Микроструктурный анализ порошков проводили на растровом электронном микроскопе JSM 6480LV фирмы Jeol.

Исследование металлических порошков сплавов ЭП718 и ЭП648

для лазерной газопорошковой наплавки

Исследование структуры поверхности гранул сплава ЭП648-ВИ показало, что они имеют преимущественно сферическую форму. Для всех гранул характерна выраженная дендритная структура (рис. 1) во всем диапазоне гранулометрического состава, при этом окислений и других загрязнений поверхности не отмечено. Наиболее характерным дефектом для гранул сплавов ЭП648 и ЭП718 является наличие сателлитов, также встречаются поврежденные гранулы несферической формы. В целом для порошков данной фракции характерно значительно большее количество дефектов гранул, чем для фракции, применяемой при селективном лазерном сплавлении (10–50 мкм) [10, 11]. Измерение текучести полученных порошков показало, что наличие подобных дефектов не является критичным для их применения в технологии лазерной газопорошковой наплавки. Более подробная информация по получению и исследованию структуры отечественных порошков для лазерной газопорошковой наплавки приведена в работах [12–14].

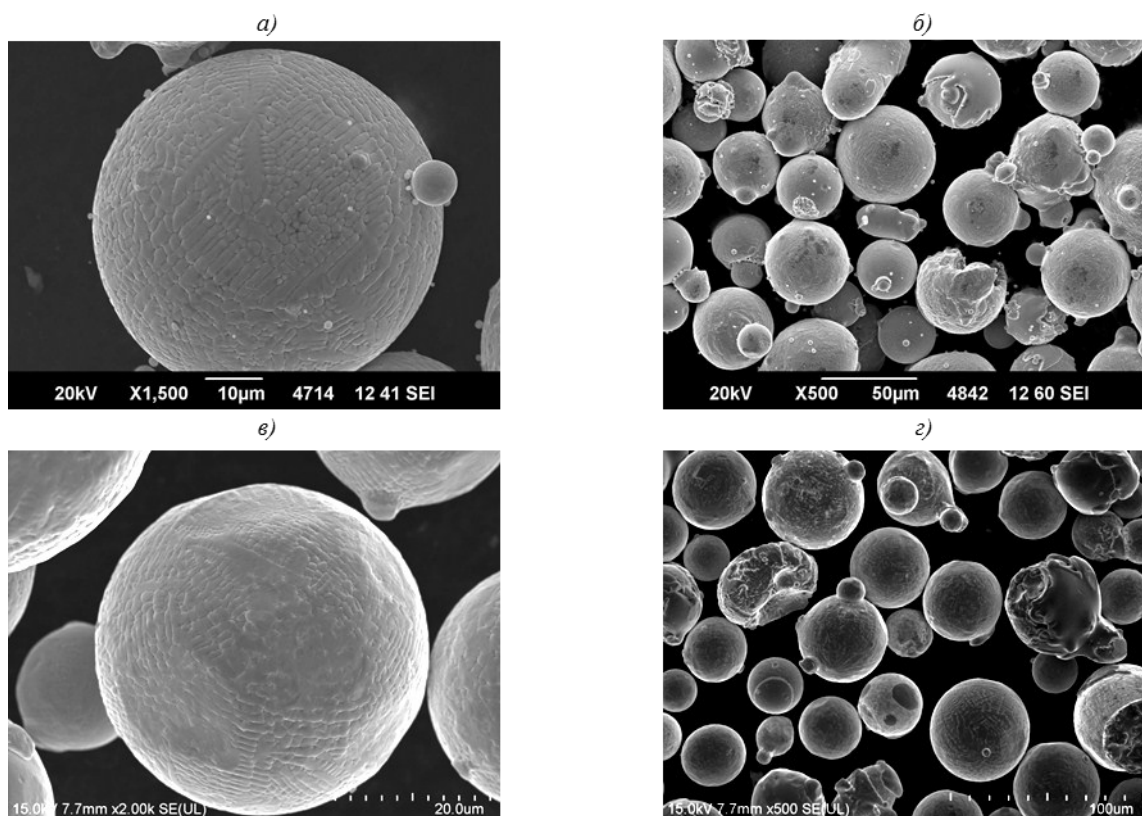


Рис. 1. Микроструктура поверхности гранул порошка из сплавов ЭП648-ВИ (а, б) и ЭП718 (в, г)

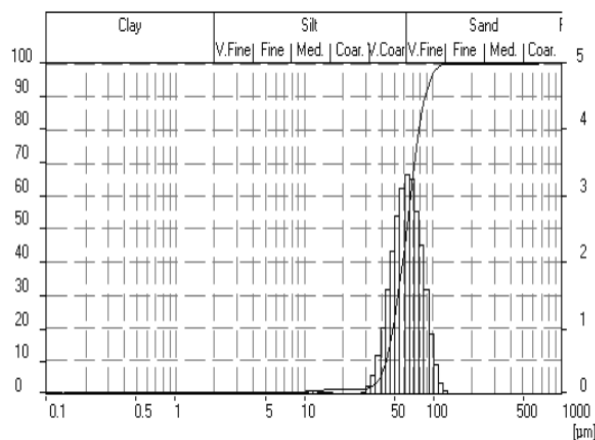


Рис. 2. Фракционный состав порошка из сплава ЭП718

Типичный фракционный состав порошков, примененных в данной работе, приведен на рис. 2. Как видно, основной диапазон частиц находится в пределах 50–80 мкм, количество частиц размером <40 мкм – минимально, а пылевой фракции – лишь следы.

Применение порошка из сплава ЭП718 для ремонта деталей горячего тракта ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки в условиях АО «НПЦ газотурбостроения «Салют»
Технология лазерной газопорошковой наплавки также относится к аддитивным технологиям и

позволяет восстанавливать такие дорогостоящие детали, как рабочие и сопловые лопатки, детали камеры сгорания, компрессора. Для лазерной наплавки применяют порошки более крупных фракций, чем для селективного лазерного сплавления. В зависимости от марки оборудования granulометрический состав применяемых порошков несколько отличается, однако, как правило, частицы <40 мкм для данной технологии не применяются, так как они могут вызвать засорение дюзы, через которую порошок подается в фокальное пятно лазера.

Экспериментальные работы по отработке режима наплавки сплава ЭП718 при формировании одиночных валиков наплавленного материала на плоских образцах-мишенях показали, что формирование плотного наплаваемого валика происходит при относительно небольших мощностях лазера. Влияние мощности лазера и скорости подаваемого порошка на ширину получаемого валика приведено на рис. 3. Видно, что с увеличением мощности лазера толщина валика увеличивается, что обусловлено более полным вовлечением в процесс присадочного порошка. Одновременно, на нижней границе мощности при увеличении скорости подачи порошка на определенной границе ширина валика начинает уменьшаться, что связано с уменьшением прогрева основы из-за избытка присадочного порошка в фокальном пятне и меньшим прилипанием расплавленных капель порошка к поверхности подложки.

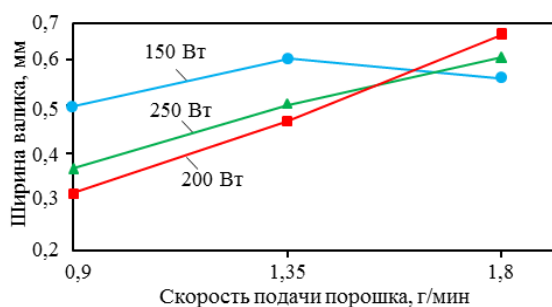


Рис. 3. Влияние мощности лазера и скорости подачи порошка на ширину наплаваемого валика

Общий вид и макроструктура наплавленного валика представлены на рис. 4. Видно, что наплавка в сечении имеет каплевидную форму. Наплавленный материал имеет четкую границу с подложкой. Проплавление основного материала составляет ~200 мкм, наплавленный материал при этом имеет хорошее сплавление с подложкой, пор и трещин на границе раздела не выявлено. Микроструктура наплавки ячеистая с полиэдрическим (равноосным) зерном размером 4–5 мкм.

Определение химического состава по высоте наплавленного материала показало, что материалы наплавки и подложки почти идентичны и мало меняются по глубине и соответствуют составу сплава ЭП718 (рис. 5, табл. 1).

Измерение микротвердости (рис. 6) по глубине наплавленного материала показало отсутствие ярко выраженной зоны термического влияния (ЗТВ). Микротвердость изменяется в диапазоне от ~2500 (на краях наплавки) до ~4000 МПа – в подложке. Увеличение микротвердости в подложке рядом с наплавкой объясняется наклепом и прохождением пластической деформации, о чем свидетельствуют линии «двойникования».

При многопроходной наплавке отработали технологические параметры наплавки материалов

на плоские и торцевые участки образцов, в том числе учитывающие изменение геометрической формы и толщины профиля образцов (рис. 7).

Структура материала при многопроходной наплавке плотная, дендритного строения (рис. 8). Хорошо различимы слои наплавленного материала, на границах слоев не наблюдается трещин, пор, неслитин.

По отработанным режимам проведена наплавка боковых граней и торца лопаток компрессора. Получено требуемое восстановление геометрической формы лопатки с учетом последующей механической обработки.

Применение порошка из сплава ЭП648 для ремонта деталей горячего тракта ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки в условиях ОАО «Авиадвигатель»

На ОАО «Авиадвигатель» металлпорошковую композицию сплава ЭП648 применяли для восстановления на лазерном комплексе TnuLaser Cell 7020 фирмы Trumpf крайних гребешков бандажных полок рабочих лопаток ТВД второй ступени ГТУ-16 – газотурбинной установки на базе двигателя ПС-90А (рис. 9).

Исследования микроструктуры наплавленного металла показали, что ЗТВ при наплавке составляет 0,1–0,15 мм. Наплавленный материал плотный (рис. 10, а), единичные внутренние поры имеют размер 10–70 мкм, что не превышает требований нормативной документации на лопатки. Неметаллических включений и несплавлений в ходе анализа не выявлено. Отсутствие поверхностных дефектов в наплавленном материале подтверждено результатами люминесцентного контроля (рис. 11).

Исследование микротвердости наплавленного металла и металла основы (табл. 2) показывает отсутствие разупрочнения в зоне термического воздействия. Более низкие значения твердости наплавленного материала типичны для закаленного состояния сплава ЭП648 при малом количестве упрочняющей фазы.

Проведенный комплекс исследований наплавленного металла показал, что при использовании порошка высокохромистого сплава ЭП648 оптимальный режим газопорошковой наплавки обеспечивает восстановление требуемой геометрической формы лопатки и позволяет получать плотную однородную структуру наплавленного материала без трещин и непроваров на границе раздела.

По данной технологии в условиях ОАО «Авиадвигатель» проведено восстановление геометрической формы и значительно более крупных деталей: стенки жаровой трубы, торцов рабочих колец ТВД [15], что свидетельствует о широких перспективах применения данной технологии на отечественных моторостроительных предприятиях при использовании отечественных универсальных сплавов, обладающих высокой жаростойкостью.

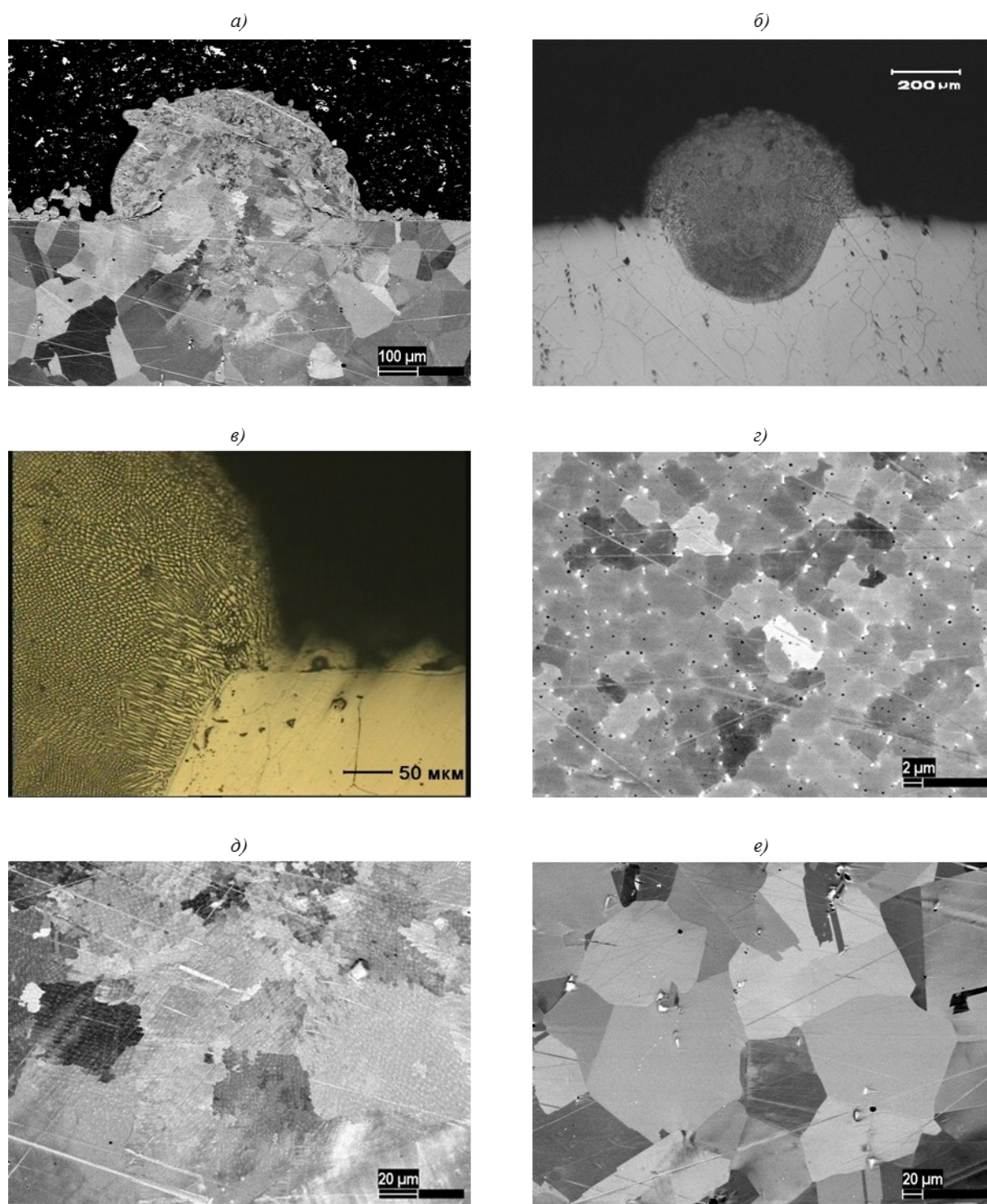


Рис. 4. Структуры поперечного среза наплавленного валика (а, б); микроструктуры границы раздела (в), верхней и нижней частей наплавленного валика соответственно (г, д) и подложки из сплава ЭП718 (е)

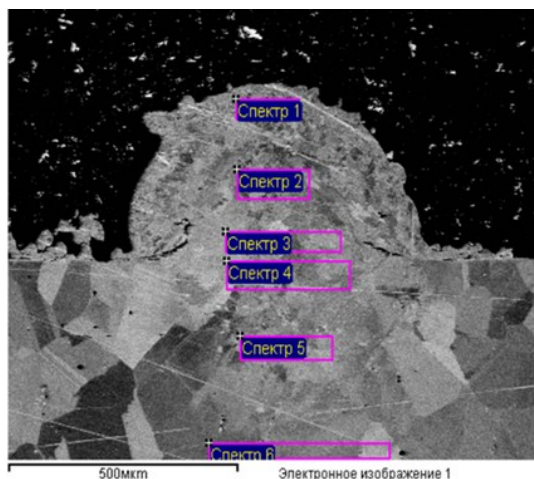


Рис. 5. Микроструктура наплавленного материала с указанием областей, в которых проводился энергодисперсионный элементный анализ

Таблица 1

Изменение элементного состава по высоте наплавленного материала

Спектр (см. рис. 5)	Содержание элементов, % (по массе)						
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	W
1	1,12	2,26	15,92	28,20	45,01	3,99	3,51
2	1,20	2,20	15,79	28,08	44,76	4,49	3,48
3	1,10	2,23	15,97	28,57	44,87	3,91	3,35
4	1,13	2,19	16,07	28,40	45,08	4,04	3,09
5	1,10	2,43	15,83	28,08	44,95	4,28	3,33
6	1,06	2,54	16,18	28,69	44,80	3,44	3,29

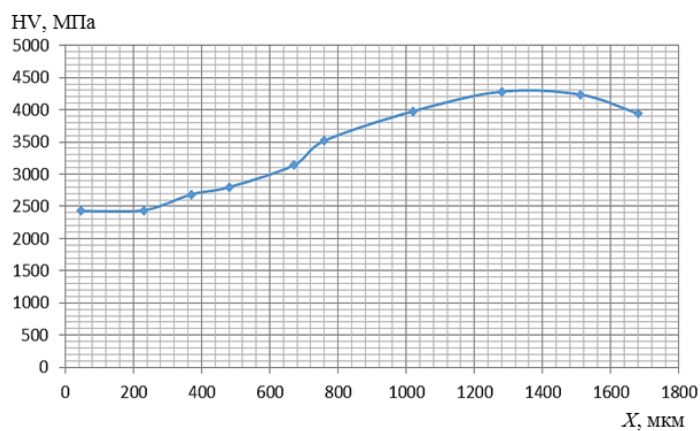


Рис. 6. Изменение микротвердости по глубине наплавки (X)

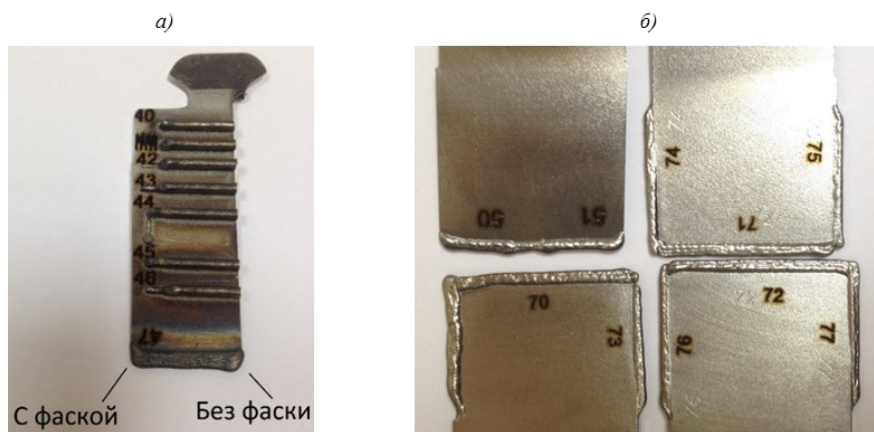


Рис. 7. Плоские образцы с многопроходной наплавкой

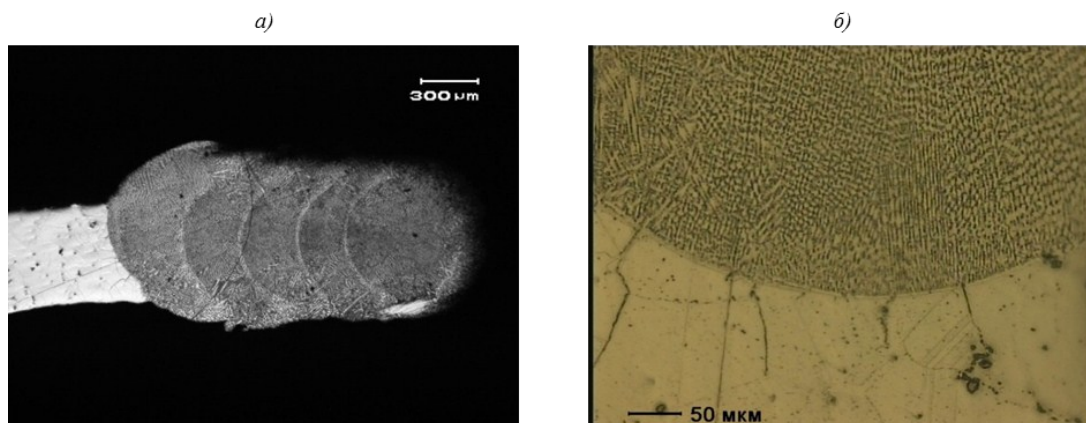


Рис. 8. Микроструктура наплавленного материала при многопроходной наплавке



Рис. 9. Процесс лазерной газопорошковой наплавки (а) и внешний вид (б) восстановленных крайних гребешков бандажных полок лопаток ТВД

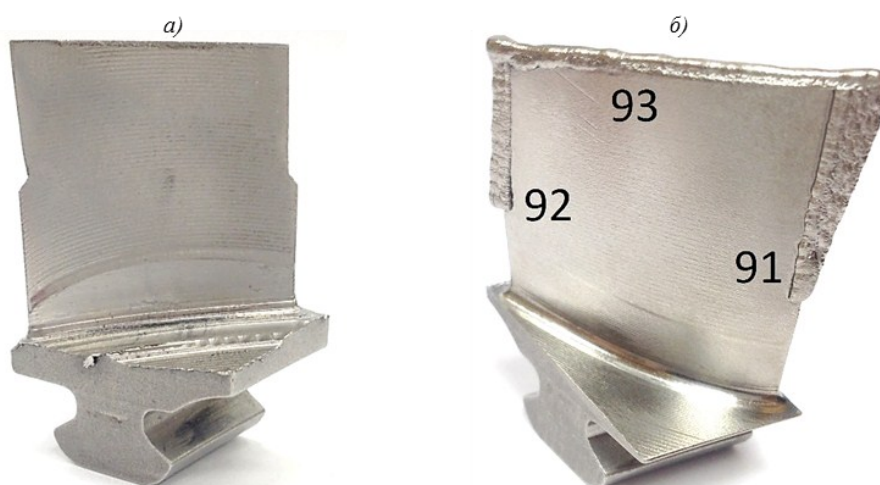


Рис. 10. Лопатка компрессора, фрезерованная под наплавку (а) и после процесса лазерной газопорошковой наплавки (б)



Рис. 11. Микроструктура (а) и результаты люминесцентного контроля (б) восстановленных гребешков рабочих лопаток ТВД лазерной газопорошковой наплавкой

Таблица 2

Микротвердость основного и наплавленного материала

Место измерения	Значения HV
Наплавленный материал	306–326
Зона термического влияния	370–461
Основной материал	370–391

Выводы

1. Исследованы микроструктура частиц, фракционный состав и текучесть порошков из сплавов ЭП718 и ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ». Показано, что порошки обеих марок имеют преимущественно сферическую форму, высокие показатели текучести (15–17 с) и по фракционному составу могут применяться для лазерной газопорошковой наплавки.

2. Отработаны оптимальные режимы лазерной наплавки порошка из сплава ЭП718 на плоских образцах при однократной наплавке, на модельных образцах и лопатках компрессора из сплава ЭП718 – при многократной наплавке. Показано, что отработанные оптимальные режимы наплавки обеспечи-

вают получение плотной структуры дендритного строения без трещин, пор, непроплавов и данная технология может быть применена для восстановления геометрической формы компрессорных лопаток в серийном производстве.

3. Проведенный комплекс исследований материала из сплава ЭП648, полученного методом лазерной газопорошковой наплавки, показал, что при использовании порошка высокохромистого сплава ЭП648 оптимальный режим газопорошковой наплавки обеспечивает восстановление требуемой геометрической формы лопатки и позволяет получать плотную однородную структуру наплавленного материала без трещин и непроваров на границе раздела.

ЛИТЕРАТУРА

- Schmidt M. The Additive manufacturing in production: Challenges and opportunities // Proc. SPIE. 2-nd Int. Symp. on Laser 3D Manufacturing. 2015. No. 9353. P. 9353–2.
- Щедрин Е.Ю., Якушин Н.И., Попов А.С. и др. Внедрение индустриальной технологии гетерофазной порошковой лазерной металлургии в ПАО «КУЗНЕЦОВ» для производства деталей двигателя НК-36СТ // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: матер. II Междунар. конф. М.: ВИАМ, 2016. С. 14.
- Li L. Heat Transfer and Residual Stress Characteristics in Laser Additive Manufacturing by Powder Injection // Proc. Pro-AM. 2014. P. 25.
- Fan Z., Wong B.S. Potentials and Challenges of NDE Methods in Additive Manufacturing // Ibid. Paper 070. P. 12.
- Hascoet J.Y., Marya S., Marya M., Singh V. «Materials Science» Challenges in the Additive Manufacturing of Industrial Parts // Ibid. 2014. Paper 037. P. 18.
- Каблов Е.Н. Что такое инновации // Наука и жизнь. 2011. №11. С. 16–21.
- Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
- Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информац. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
- 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.
- Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
- Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // Технология машиностроения. 2015. №9. С. 11–16.
- Неруш С.В., Евгенов А.Г., Ермолаев А.С., Рогалев А.М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD-наплавки // Вопросы материаловедения. 2013. №4 (76). С. 98–107.
- Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.
- 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.-технич. журн. 2014. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
- Ермолаев А.С., Иванов А.М., Васильев С.А. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2013. №35. С. 49–64.