

УДК 669.018.44:669.245

С.В. Неруш¹, А.С. Ермолаев², А.М. Рогалев¹, С.А. Василенко¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТОРЦА ПЕРА РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ (ТВД) ИЗ СПЛАВА ЖС32-ВИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА СПЛАВА ЖС32-ВИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ АТОМИЗАЦИИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-4-4

Исследован металлический порошок сплава ЖС32-ВИ для лазерной газопорошковой наплавки, изготовленный методом атомизации на установке HERMIGA 10/100 VI. Показано, что полученные гранулы имеют правильную сферическую форму с малым количеством дефектных гранул. Проведена оценка качества наплавки торца пера рабочих лопаток первой ступени ТВД. Лазерная газопорошковая наплавка, выполненная с применением металлического порошка сплава ЖС32-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм после дегазационного отжига и технологического подогрева, обеспечивает высокое качество наплавленного материала (наличия дефектов типа микротрещин и непроваров не выявлено), а также восстановление геометрии в полном объеме.

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») [1].

Ключевые слова: атомизация, металлический порошок, лазерная газопорошковая наплавка, гранулометрический состав, морфология поверхности, рабочие лопатки.

The ZS32-VI metal alloy powder for laser metal deposition dispersed by gas atomization at HERMIGA 10/100 VI is researched. It is shown that the granules have a regular spherical shape with a small number of defective granules. The deposition quality of the rotor blade feather end of the high-pressure turbine first stage is performed. Laser metal deposition, performed with ZS32-VI metal alloy powder with granulometric composition 40–80 μm after degassing annealing and heating, provides with high quality deposited material (defects such as microcrack or lack of penetration are not revealed), and geometry retailoring in full.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 10.4. «Technologies of bi-and polymetallic naturally reinforced metal materials by method of direct laser synthesis from metal powders» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: gas atomization; metal powder, laser metal deposition, granulometric composition, surface morphology, rotor blade.

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

²Открытое акционерное общество «Авиадвигатель» [Open Joint Stock Company «Aviadvigatel»] E-mail: office@avid.ru

Введение

Известно, что повышение коэффициента полезного действия (КПД) газотурбинных двигателей (ГТД) во многом зависит от величины радиального зазора в проточной

части турбины между торцами рабочих лопаток и уплотнительными кольцами или вставками, т. е. от эффективности системы уплотнения радиального трека, определяемой, в свою очередь, соотношением износов торцов лопаток и уплотнения [2–7]. Существующие статистические данные по эксплуатации некоторых конструкций газотурбинных двигателей показывают, что увеличение износа рабочих лопаток по торцам на 0,2 мм приводит не только к уменьшению их ресурса работы, но и к снижению на 1% КПД двигателя. Это, соответственно, приводит к увеличению расхода топлива и уменьшению мощности установки в целом, а также повышению температуры и, как следствие, к снижению ресурса горячей части двигателя. Ввиду дороговизны рабочих лопаток ТВД актуальной является разработка технологии их ремонта.

Решить данную проблему можно с помощью нанесения на торец лопатки наплавочного материала, как правило, из матричного сплава рабочей лопатки. Однако традиционные технологии требуют применения наплавляемого материала в виде проволоки или специально отлитых пластин (в случае напайки), имеющих форму пера лопатки. Получение таких пластин и пайка – процессы трудоемкие, не обеспечивающие высокого выхода годного. Большинство сплавов, обладающие высокими износо- и жаростойкостью, относятся к хрупким материалам, получение проволоки из которых невозможно. Кроме того, пайка или наплавка материала, отличающегося по физическим характеристикам и химическому составу от основного материала лопатки, приводит к возникновению термических напряжений и разрушению наплавленного материала из-за разницы коэффициентов термического напряжения.

Решением проблемы ремонта рабочих лопаток может стать применение аддитивной технологии ремонта, в частности технологии лазерной газопорошковой наплавки (LMD (Laser Metal Deposition) или DMD (Direct Metal Deposition)) [8]. Лазерная порошковая наплавка основана на сплавлении частиц порошка, подаваемого роботизированным дозирующим устройством в виде газопорошковой смеси коаксиально лазерному лучу (или не коаксиально через специальные дюзы малого сечения). Наплавка производится по 3D-модели, построение которой происходит на основании данных встроенного промышленного сканера. Такая технология может быть востребована не только при ремонте и упрочнении поверхности детали, но и для создания принципиально новых градиентных материалов, которые могут быть получены за один технологический цикл производства благодаря применению сразу нескольких разных марок порошка, смешиваемых в реальном времени по компьютерной программе.

В качестве исходного материала для лазерной порошковой наплавки широко используются мелкодисперсные металлические порошки из сплавов на различной основе [9–11]. К металлическим порошкам для данной технологии предъявляются жесткие требования. В первую очередь, это обеспечение сферичности, строго определенного гранулометрического состава, высокой химической однородности, отсутствие пористых гранул, пониженное содержание газовых примесей.

На сегодняшний день Россия отстает от западных стран в этой области ввиду отсутствия серийного производства отечественных порошковых материалов, разработанных технологий и нормативной технической документации, что соответственно приводит к сдерживанию внедрения аддитивных технологий в промышленность, поэтому актуальной задачей является разработка технологий получения исходных порошковых материалов и ремонта поврежденных деталей (рабочих лопаток ТВД) с применением аддитивных технологий.

Данная работа посвящена исследованию мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС32-ВИ (гранулометрического состава, текучести, микроструктуры поверхности частиц порошка), изготовленного методом атомизации на установке HERMIGA 10/100 VI [1, 12, 13], а также исследованию технологии восстановления торца пера рабочей лопатки первой ступени

ТВД методом лазерной газопорошковой наплавки с применением металлического порошка сплава ЖС32-ВИ.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран жаропрочный сплав на никелевой основе ЖС32-ВИ [14, 15], химический состав которого приведен в табл. 1.

Исходную шихтовую заготовку жаропрочного сплава ЖС32-ВИ для процесса атомизации (распыление расплава инертным газом) получали методом вакуумной индукционной выплавки на установке ВИАМ–2002 с использованием специальной разливочной оснастки в виде разъемного чугунного кокиля, обеспечивающей получение заготовок диаметром 30 мм.

Таблица 1

Химический состав жаропрочного сплава ЖС32-ВИ на основе никеля (требования по ТУ)

Содержание элементов, % (по массе)									
Co	W	Mo	Cr	Al	Re	Ta	C	Si	S
9–9,5	8,1–8,9	0,9–1,3	4,5–5,3	5,7–6,2	3,6–4,3	3,7–4,4	0,12–0,17	≤0,2	≤0,005
P	Fe	Mn	B	Nb	V	Bi	Sb	As	Se
≤0,01	≤0,5	≤0,3	≤0,02	1,4–1,8	≤0,15	≤0,0005	≤0,0015	≤0,0015	≤0,0005
Ag	Sn	Cu	Pb	Ce	Y	La	Zn	[O ₂]	[N ₂]
≤0,0002	≤0,0015	≤0,03	≤0,0005	≤0,025	≤0,005	≤0,005	≤0,0015	≤0,01	≤0,002

Металлический порошок сплава ЖС32-ВИ получали путем распыления расплава аргоном на атомизере HERMIGA 10/100 VI. Распыление расплава вели холодным (без дополнительного подогрева) газом с использованием газодинамической форсунки дозвукового профиля (рис. 1).

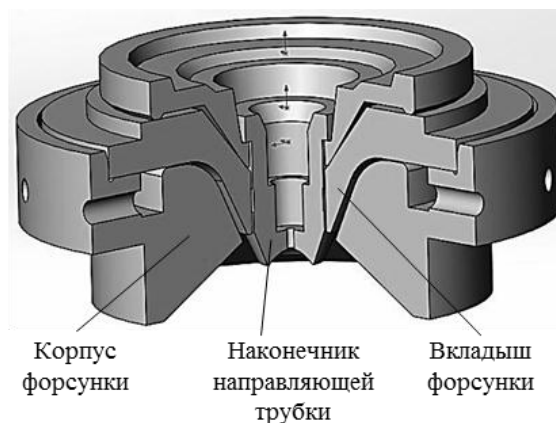


Рис. 1. Разрез 3D-модели газодинамической форсунки установки HERMIGA 10/100 VI

Получение металлического порошка сплава ЖС32-ВИ методом атомизации проводили по трем режимам. Изменяемым (задаваемым) параметром процесса атомизации был принят расход распыляющего газа, который зависит от давления распыления, профиля внутренней полости форсунки, формируемой корпусом и вкладышем. Корректировку расхода газа проводили по штатному расходомеру установки HERMIGA 10/100 VI путем изменения давления распыления. Остальные технологические параметры процесса атомизации (диаметр струи расплава, температура расплава, избыточное давление над расплавом) выбирали постоянными.

Гранулометрический состав порошка сплава ЖС32-ВИ проводили методом ситового анализа согласно ГОСТ 18318–94 «Порошки металлические. Определение раз-

мера частиц сухим просеиванием» с помощью виброгрохота Analysette 3 Spartan с набором сит 40–63, 63–80, 80–100, 100–125, 125–160 мкм (ГОСТ 6613) и штатного классификатора установки HERMIGA 10/100 VI для просеивания тонкой фракции менее 40 мкм на гранулы размером 0–10, 10–20 и 20–40 мкм.

Фракционный состав порошка сплава ЖС32-ВИ размером 40–80 мкм определяли методом лазерной дифракции на приборе измерения размера части Analysette 22 Nanotec plus с общим диапазоном измерений 0,01–2000 мкм, оснащенный тремя полупроводниковыми лазерами, что отвечает требованиям ГОСТ 8.777 «Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения» и международному стандарту ISO 13320 «Particle size analysis – Laser diffraction method». Исследования проводили по таким основным параметрам, как количество частиц размером менее 20 мкм (пылевая фракция) и со средним размером частиц порошка (d_{cp}). Наличие гранул размером менее 20 мкм в большом количестве приводит к комкованию порошков и, как следствие, снижению показателя текучести материала, в связи с чем использование его в процессе лазерной газопорошковой наплавки невозможно. Параметр d_{cp} характеризует средний размер порошков в заданной фракции.

Определение текучести порошка сплава ЖС32-ВИ размером 40–80 мкм проводили при помощи калиброванной воронки (прибора Холла) согласно ГОСТ 20899 «Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла)».

Исследование формы частиц и морфологии поверхности порошка сплава ЖС32-ВИ, а также микроструктуры поперечных шлифов гранул проводили с помощью растрового электронного микроскопа JSM 6490-LV. Для описания формы частиц использовали справочное приложение ГОСТ 25849 «Порошки металлические. Метод определения формы частиц».

Наплавку порошка сплава ЖС32-ВИ на торцы пера рабочих лопаток первой ступени ТВД из сплава ЖС32-ВИ выполняли в лазерном центре TruLaser Cell 7020 в условиях предприятия ОАО «Авиадвигатель».

Результаты

Для определения влияния параметров атомизации (табл. 2) на фракционный состав порошков проведен ситовой анализ полученных опытных партий порошка сплава ЖС32-ВИ. Данные по фракционному составу металлического порошка жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ приведены в виде кумулятивных кривых (рис. 2).

Таблица 2

**Параметры атомизации при получении опытных партий
металлического порошка сплава ЖС32-ВИ**

Режим	Расход газа на форсунке	Расход расплава	Температура расплава, °С
	кг/мин		
1	3,5	2,48	1652
2	7,5	1,9	
3	4,5	1,84	

Установлено, что увеличение расхода газа не приводит к значительному росту пылевой фракции (0–10 мкм), содержание которой не превышает 12–13%. Видно (рис. 2), что комбинация наибольшего расхода газа при минимальном расходе металла (режимы 2 и 3) обеспечивает получение наиболее тонких порошков. Повышение расхода газа до

7,5 кг/мин (режим 3) приводит к увеличению выхода годного по фракции 10–50 мкм порошка – с 35 до 84%. При расходе газа 4,5 кг/мин (режим 2) обеспечивается максимальный выход годного по фракции 40–80 мкм порошка (36%), который применяется для лазерной газопорошковой наплавки.

Анализ фракционного состава порошка сплава ЖС32-ВИ размером 40–80 мкм (рис. 3) показал, что количество гранул менее 20 мкм находится на весьма низком уровне и не превышает 1%, что свидетельствует о высокой эффективности предварительно проведенной газодинамической сепарации для удаления особо тонких частиц. Средний размер порошков (d_{cp}) в заданной фракции составляет 65 мкм.

В результате исследования текучести порошка сплава ЖС32-ВИ фракции 40–80 мкм установлено, что он обладает способностью свободного протекания через воронку с отверстием 2,5 мм, что обусловлено сферической формой частиц порошка и высокой удельной плотностью сплава. Текучесть порошка сплава ЖС32-ВИ фракции 40–80 мкм находится на уровне 15–15,5 с.

Типичные микроструктуры поверхности частиц порошка сплав ЖС32-ВИ в зависимости от гранулометрического состава приведены на рис. 4. Установлено, что во всех исследованных образцах гранулы порошка имеют правильную сферическую форму с малым количеством дефектных гранул. Характерными дефектами для исследуемых сплавов являются сателлиты и аморфный панцирь (реже). Отмечаются также единичные гранулы неправильной формы. Наибольшее количество дефектных гранул наблюдается в образцах с размером гранул 40–80 мкм.

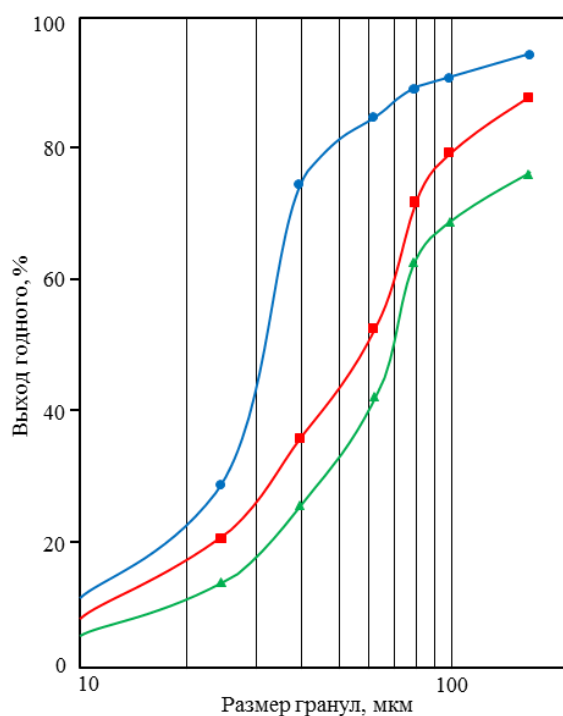


Рис. 2. Фракционный состав партий порошка сплава ЖС32-ВИ, полученных по режимам 1 (▲), 2 (■) и 3 (●)

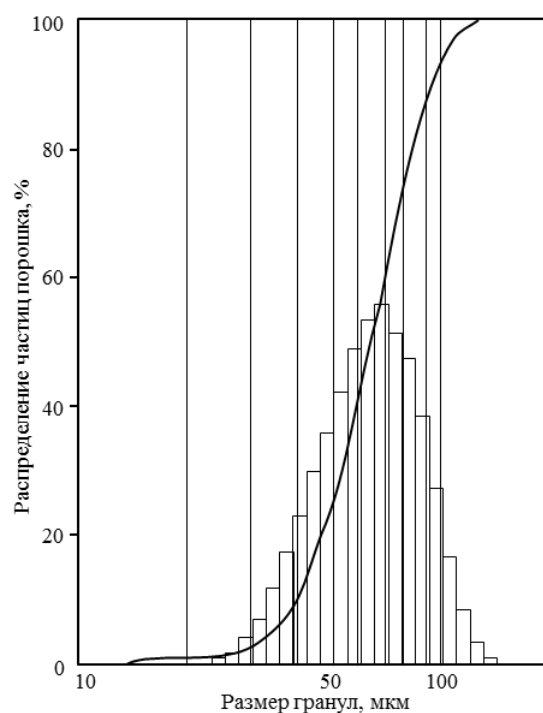


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц порошка сплава ЖС32-ВИ фракции 40–80 мкм

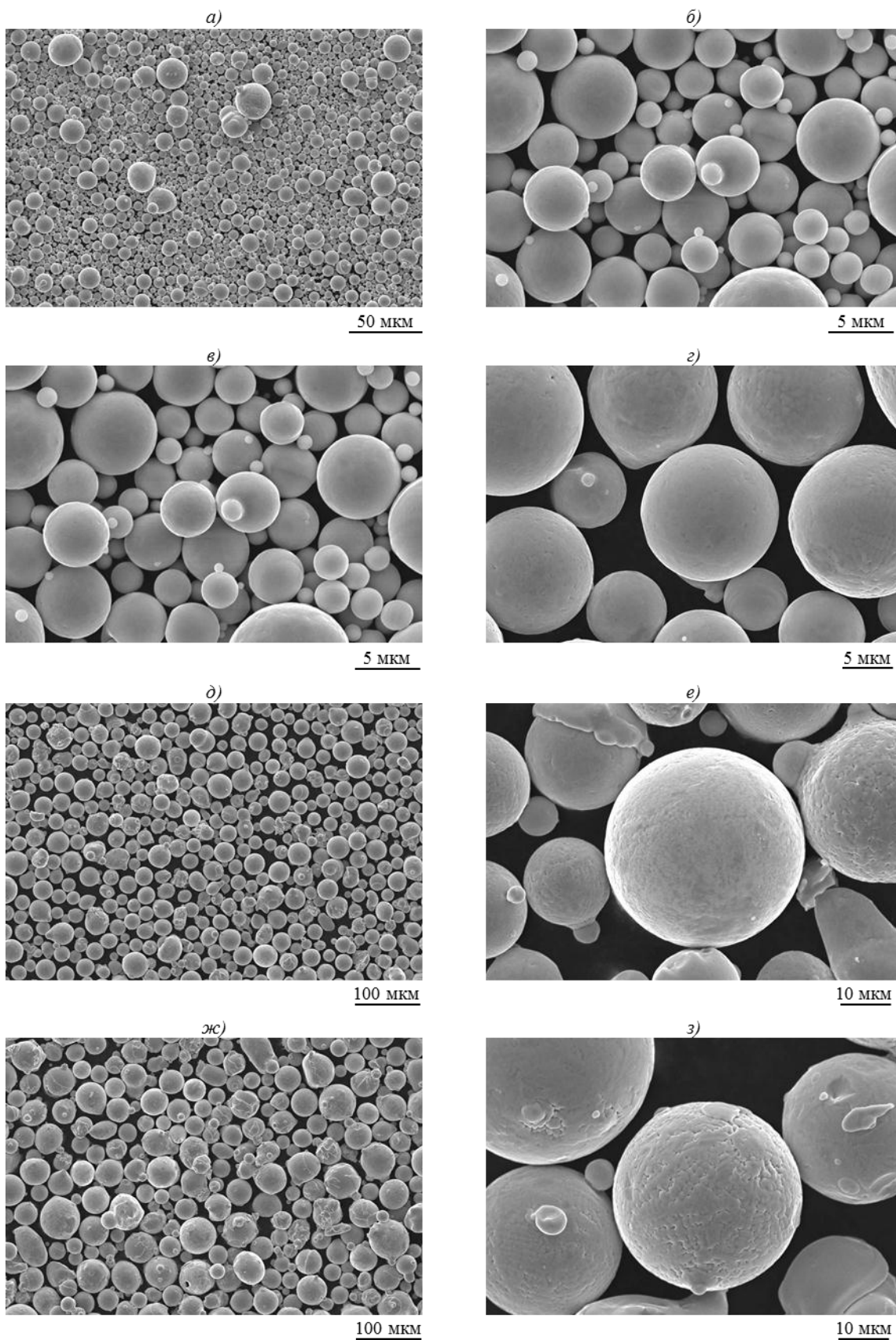


Рис. 4. Морфология поверхности гранул сплава ЖС32-ВИ фракций 0–10 (а, б), 10–25 (в, г), 25–40 (д, е) и 40–80 мкм (ж, з)

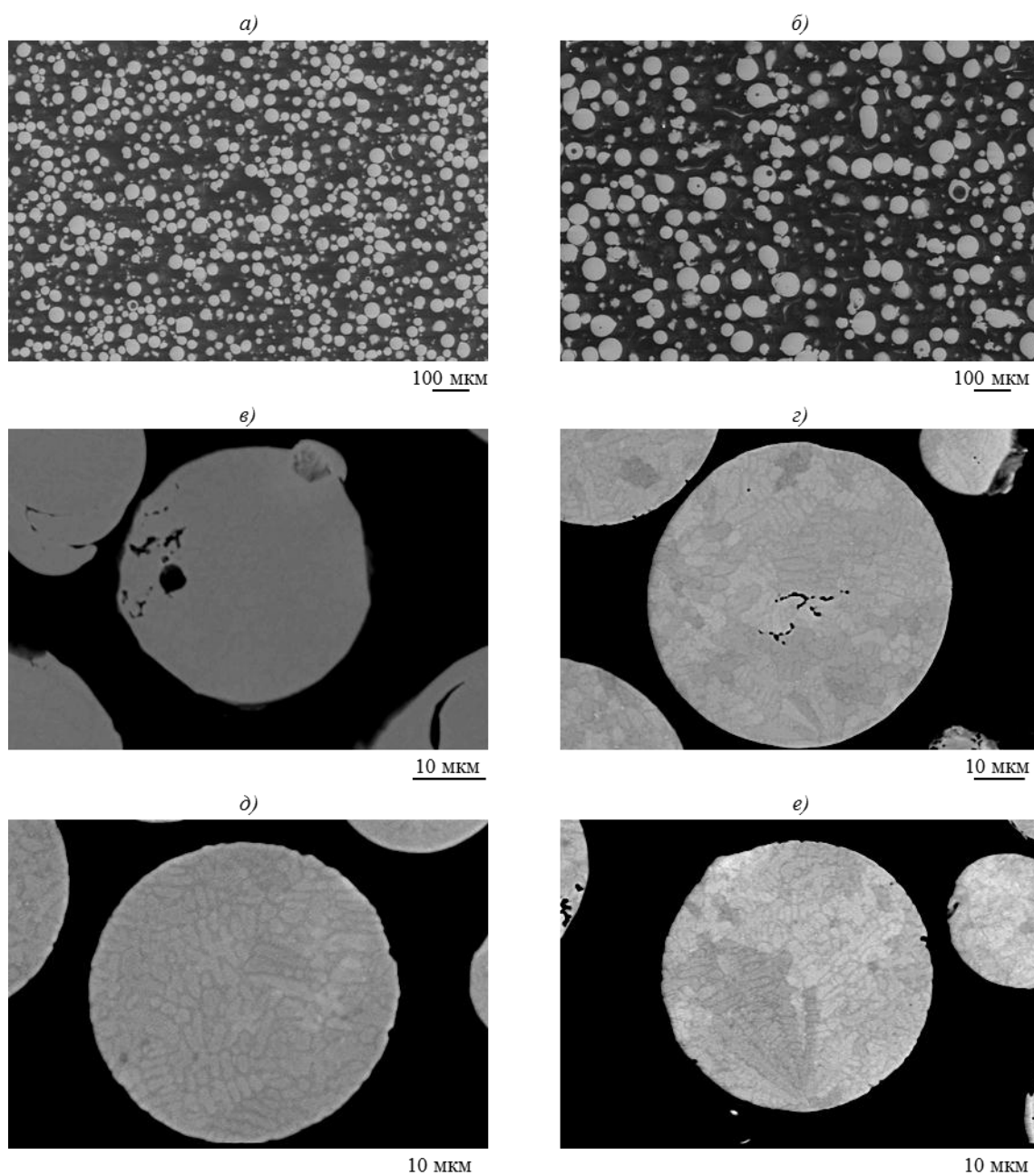


Рис. 5. Микроструктура гранул сплава ЖС32-ВИ фракций 25–40 (*а, в, д*) и 40–80 мкм (*б, з, е*)

Исследования структуры поперечного сечения и пористости гранул показали, что гранулы имеют дендритное строение (рис. 5). Характер роста дендритов указывает на объемную кристаллизацию, а прорастание отдельных развитых дендритов связано, по-видимому, с ранним появлением центров кристаллизации на месте примесных включений или более мелких кристаллизованных гранул (микросателлитов). В гранулах размером менее 40 мкм (рис. 5, *а, д*) газовая пористость практически отсутствует. Для более крупных фракций характерно наличие в полях зрения отдельных гранул с замкнутыми (газовыми) порами. Помимо газовой отмечается наличие пористости усадочного происхождения (неплотности неправильной формы), что объясняется высокими скоростями охлаждения в процессе кристаллизации частиц и нарушением подпитки замкнутых объемов в междендритных пространствах.

Лазерная газопорошковая наплавка

Полученный порошок сплава ЖС32-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм применен при отработке технологии восстановления торца пера рабочей лопатки первой ступени ТВД (рис. 6) методом лазерной газопорошковой наплавки на лазерном центре TruLaser Cell 7020 в условиях ОАО «Авиадвигатель».

В результате контроля наплавленных слоев посредством оптической микроскопии выявлены трещины (рис. 7). Микроанализ, проведенный на поперечных шлифах, подтвердил наличие трещин, развивающихся по материалу наплавки. Протяженность трещин составила от 0,3 до 1 мм. Трещин, развивающихся от наплавки в основной материал, не выявлено. Наличие трещин в наплавочном материале является неудовлетворительным результатом, так как снижает ресурс восстановленных рабочих лопаток. Основными вероятными причинами образования трещин в наплавленном материале являются высокое содержание адсорбированного кислорода на поверхности части порошка сплава ЖС32-ВИ и термическое напряжение, возникающее в процессе наплавки.



Рис. 6. Внешний вид рабочей лопатки первой ступени ТВД из сплава ЖС32-ВИ с наплавленными слоями порошка ЖС32-ВИ

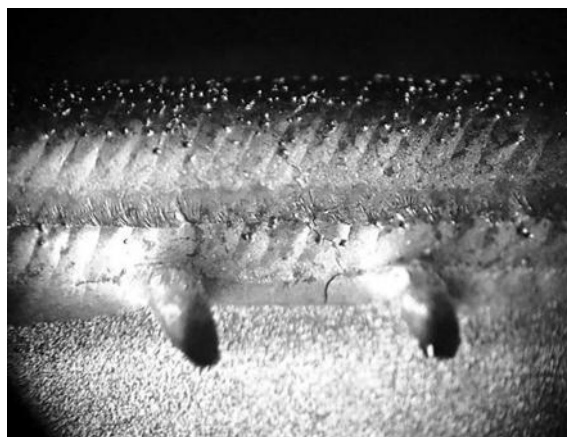


Рис. 7. Вид трещины в наплавке рабочей лопатки первой ступени ТВД

Для удаления адсорбированного кислорода и снижения склонности к трещинообразованию материала при наплавке были выполнены:

- дегазационный отжиг порошка сплава ЖС32-ВИ;
- технологический подогрев пера лопатки до температур выше 500°C;
- термообработка восстановленных рабочих лопаток в вакуумной печи.

В результате дегазационного отжига порошка сплава ЖС32-ВИ в вакуумной печи установлено, что содержание кислорода в порошке сплава уменьшилось с 0,0097 до 0,006% (по массе).

Геометрия торца пера рабочих лопаток первой ступени ТВД восстановлена в полном объеме. Высота наплавки составила 1,8 мм. В материале наплавки дефектов типа трещин и непроваров не выявлено. Материал наплавки плотный, ширина зоны термического влияния составила до 0,2 мм, микротвердость материала наплавки 452–456 HV, зоны термического влияния 450–462 HV, основы 399–407 HV.

По результатам металлографических исследований установлено, что качество лазерной наплавки порошка сплава ЖС32-ВИ на торец пера лопаток первой ступени ТВД из сплава ЖС32-ВИ удовлетворительное (рис. 8 и 9) и соответствует требованиям ТУ.

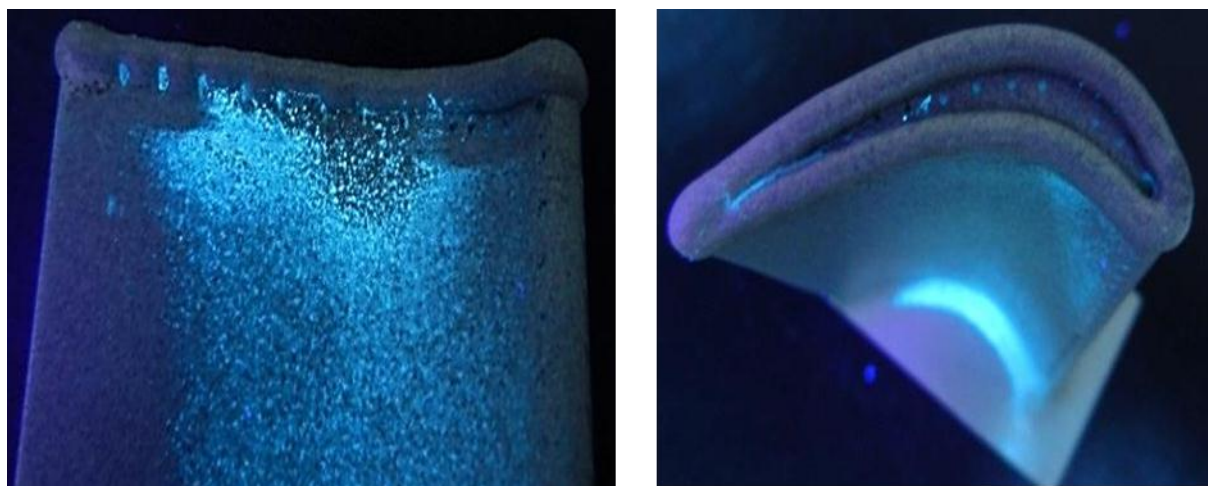


Рис. 8. Вид индикаций при ЛЮМ1-ОВ контроле рабочей лопатки первой ступени с наплавленным торцом пера



Рис. 9. Вид наплавленного слоя на рабочей лопатке (поперечный микрошлиф)

Таким образом, в результате выполненных работ установлено, что положительный результат восстановления торца пера лопатки достигается при применении отожженного присадочного порошка и подогрева пера лопатки выше 500°C.

Обсуждение и заключения

Разработанная технология получения порошка сплава ЖС32-ВИ методом атомизации обеспечивает получение гранул правильной сферической формы с малым количеством дефектных гранул и наиболее высокий выход годного по фракции 40–80 мкм (на уровне 35%) в сравнении с существующими в России технологиями получения металлических порошков.

В результате процесса восстановления торца пера рабочей лопатки первой ступени ТВД методом лазерной газопорошковой наплавки образуются трещины в материале наплавки. Для исключения образования дефектов необходимо применение отожженного присадочного порошка и проведение сопутствующего подогрева пера лопатки выше 500°C с последующей вакуумной термической обработкой.

Лазерная газопорошковая наплавка, выполненная с использованием металлического порошка сплава ЖС32-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм после дегазационного отжига и технологического подогрева, применялась при восстановлении торца пера рабочих лопаток первой ступени ТВД. Геометрия торца пера рабочих лопаток первой ступени ТВД восстановлена в полном объеме. Высота наплавки составила 1,8 мм. В материале наплавки дефектов типа трещин и непроваров не выявлено. Материал наплавки плотный, ширина зоны термического влияния составила до 0,2 мм, микротвердость материала наплавки 452–456 НВ, зоны термического влияния 450–462 НВ, основы 399–407 НВ.

По результатам металлографических исследований установлено, что качество лазерной наплавки порошка сплава ЖС32-ВИ на торец пера лопаток первой ступени ТВД из сплава ЖС32-ВИ удовлетворительное и соответствует требованиям ТУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 36–52.
4. 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.
5. Разуваев Е.В. Производство полуфабрикатов из современных и перспективных жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2002. Вып.: Технологии производства авиационных материалов. С. 35–39.
6. Ломберг Б.С., Овсеян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 52–57.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.07.2015).
8. 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.

9. 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: 10.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
10. 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: 10.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
11. 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: 10.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.
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. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом автоматизации расплава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. Спец. вып.: Перспективные конструкционные материалы и технологии. С. 79–87.
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. №5. С. 97–105.
15. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 3–7.