



УДК 669.245:621.762

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СПЛАВА ЭП648,
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО
ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

А.Г. Евгенов

кандидат технических наук

А.М. Рогалев

С.В. Неруш

И.С. Мазалов

Февраль 2015

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.

А.Г. Евгенов¹, А.М. Рогалев¹, С.В. Неруш¹, И.С. Мазалов¹

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СПЛАВА ЭП648, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Исследованы структура и свойства образцов, полученных из порошка высокохромистого жаропрочного сплава ЭП648 собственного производства методом селективного лазерного сплавления на установке Concept Laser. Показано, что отработанный режим сплавления обеспечивает получение плотных деталей со средней объемной долей пористости 0,07% и высоким комплексом механических свойств, соответствующим (или превышающим) максимальные паспортные значения для литого материала.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, аддитивное производство, трек, термическая обработка, механические свойства, микроструктура.

A.G. Evgenov, A.M. Rogalev, S.V. Nerush, I.S. Mazalov

A study of properties of EP648 alloy manufactured by the selective laser sintering of metal powders

Structure and properties of pieces produced by selective laser sintering of powders of high-chromium heat-resistant alloy EP648 by Concept Laser unit were investigated. It was shown that the developed sintering conditions provide production of dense parts with average volume porosity as much as 0.07% and a high complex of mechanical properties equal (or higher) to maximum certified values for cast material.

Keywords: selective laser sintering, additive manufacturing, track, heat treatment, mechanical properties, microstructure.

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

Введение

Развитие аддитивных технологий в отечественной авиационной промышленности является одним из важнейших направлений стратегии развития материалов и технологий на ближайшие полтора десятка лет [1–6]. Однако их широкое внедрение во многом сдерживается отсутствием порошков собственного производства. В авиационной промышленности внедрение аддитивных технологий представляется весьма перспективным, так как стоимость деталей газотурбинных двигателей, в особенности ответственного назначения, весьма высока, а сокращение сроков изготовления, исключение трудоемкого изготовления оснастки (литейной, прессовой), подчас также дорогостоящей, представляет несомненный интерес при разработке и освоении производства новых изделий.

Наибольший интерес с точки зрения прямого получения конечной детали из металлического порошка на данный момент представляет технология селективного лазерного сплавления SLM (Selective Laser Melting). В этой области ряд зарубежных фирм предлагают целую линейку установок – от высокоточных (с малыми рабочими камерами) до крупных промышленных машин. Принцип данных установок – послойное нанесение металлического порошка определенного гранулометрического состава

на платформу построения и лазерная штриховка текущего сечения в соответствии с предварительно разработанной и разбитой на слои CAD-моделью. Процесс повторяется циклически до завершения построения детали, при этом деталь остается засыпанной порошком до конца построения. Для предотвращения окисления процесс синтеза ведется в герметичной камере в среде инертного газа (азота или аргона).

В ряде работ [7–12] уже проводились исследования условий формирования микроструктуры и оценка свойств синтезированных заготовок, однако все они связаны с использованием стандартных импортных порошковых материалов фирм-производителей, поставляющих их вместе с установками. Данная работа посвящена исследованию синтезированных заготовок, полученных из отечественного порошка высокохромистого сплава ЭП648, изготовленного в ВИАМ на атомайзере HERMIGA 10/100 VI. Кроме того, мало изучено влияние горячего изостатического прессования на микроструктуру и свойства синтезированного материала.

В ВИАМ разработан ряд жаропрочных никелевых сплавов [13, 14], упрочняемых химико-термической обработкой (азотированием), однако это исключительно листовые материалы, сквозное азотирование в которых возможно только на небольших толщинах. С этой точки зрения влияние среды, в которой происходит послойный синтез, на конечный уровень свойств получаемых деталей представляет несомненный интерес.

В данной работе исследована микроструктура полученных методом SLM заготовок из жаропрочного высокохромистого никелевого сплава ЭП648, а также изучено влияние среды, в которой происходит построение, газостатической и термической обработки на микроструктуру и механические свойства синтезированных образцов.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран порошок жаропрочного высокохромистого сплава на никелевой основе марки ЭП648-ВИ собственного производства гранулометрического состава 10–40 мкм, химический состав которого приведен в табл. 1. Порошок получен методом атомизации (распылением потоком аргона в среде аргона) на установке HERMIGA 10/100 VI, оснащенной вакуумным индукционным плавильным блоком с донным сливом. Рассев порошка осуществляли в промышленном виброгрохоте Concept Laser QM Powder. Отделение тонкой (менее 10 мкм) фракции проводили в газодинамическом сепараторе (классификаторе) установки HERMIGA 10/100 VI. Исследование фракционного состава полученных порошков проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analizette 22 фирмы Fritsch, а структуры гранул – на растворном электронном микроскопе JSM 840.

Таблица 1

Химический состав жаропрочного сплава ЭП648

Содержание элементов, % (по массе)							
Ni	Cr	Al	Ti	Nb	Mo	W	C
Основа	32–35	0,5–1,1	0,5–1,1	0,5–1,1	2,3–3,3	4,3–5,3	≤0,1

Обработку технологических параметров лазерного сплавления проводили с помощью установки Concept Laser M2 Cusing (Германия), внешний вид которой приведен на рис. 1. Установка оснащена иттербиевым волоконным лазером с диодной накачкой мощностью 400 Вт и длиной волны 1069 нм, с рабочим пространством зоны построения 250×250×280 мм. В системах Concept Laser используется запатентованный принцип построения объектов, называемый технологией стохастического экспонирования. Суть его состоит в том, что весь слой (текущее сечение) детали разбивается на отдельные фрагменты квадратной формы, называемые «островками». Затем лазер засвечивает

и сплавляет каждый отдельный «островок». Фрагменты сплавляются по заранее определенному алгоритму, составленному таким образом, чтобы локализовать внутренние напряжения металла в небольшом участке. Кроме того, засветка каждого «островка» происходит с помощью штриховки, а соседние «островки» заштриховываются в перпендикулярном направлении, что позволяет локализованные напряжения снижать до минимума. При сплавлении следующего сечения шаг разбивки сдвигается, направление штриховки внутри «островков» поворачивается, обеспечивая динамически изменяемый рисунок штриховки. Все «островки» сплавляются друг с другом путем полного оплавления краев «островка» – это позволяет добиваться максимально однородной и плотной структуры с минимальной пористостью.

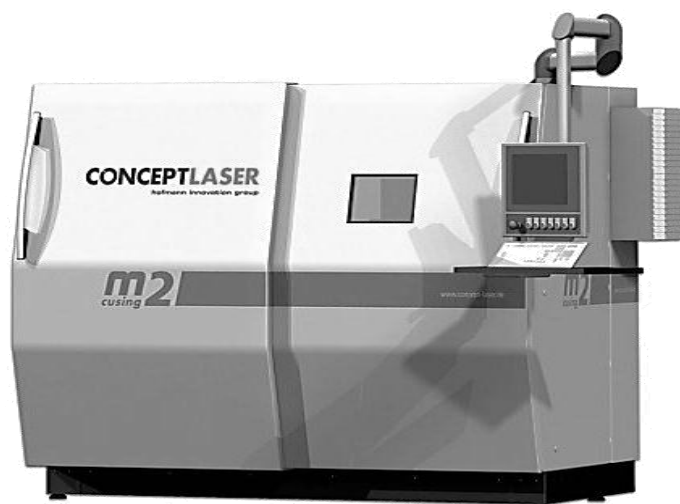


Рис. 1. Установка селективного лазерного сплавления металлических порошков Concept Laser M2 Cusing

В качестве инертной среды использовали азот, вырабатываемый штатным генератором N2 Midigas 2 фирмы Concept Laser. Содержание кислорода в процессе построения (по данным встроенного сенсора) на всех этапах составляло $<0,1\%$.

Термическую обработку SLM-образцов проводили по стандартному для сплава ЭП648 режиму.

Исследование пористости в состоянии SLM проводили на нетравленных шлифах на металлографическом комплексе фирмы «Olimpus». Съемку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335 (3 мегапикселя), подготовку изображений к количественному анализу и их математическую обработку выполняли при помощи компьютерной программы Image Expert Pro 3х. Поверхности шлифов всех образцов просматривали полностью при увеличении $\times 200$, для исследования выбирали места с наибольшим количеством микропор.

Количественный анализ микропор на поверхности шлифов проводили, анализируя 25 полей зрения для каждого образца при увеличении $\times 200$.

Площадь кадра при увеличении $\times 200$ составляла $640 \times 480 \text{ мкм} = 307200 \text{ мкм}^2 \approx 0,3 \text{ мм}^2$. Площадь, на которой проводили количественный анализ на каждом образце, приблизительно равна $0,3 \text{ мм}^2 \times 25 = 7,5 \text{ мм}^2$.

Микроструктурный анализ проводили на растровом электронном микроскопе Hitachi SU8010 и на оптическом металлографическом комплексе Olympus GX51 после электрохимического травления поверхности шлифов в растворе бихромата калия в ортофосфорной кислоте. Механические свойства образцов определяли по стандартным методикам.

Результаты и обсуждение

Исследование исходного материала – порошка сплава ЭП648, полученного в ВИАМ на установке HERMIGA 10/100 VI, – показало, что в основной массе частицы с гранулометрическим составом 10–40 мкм имеют сферическую форму (рис. 2, *а*) с незначительным количеством сателлитов и дефектных частиц неправильной формы. Поверхность гранул (рис. 2, *б*) имеет выраженную дендритную структуру без следов окисления или инородных включений. Более подробное исследование качества гранул, полученных на установке HERMIGA 10/100 VI, изложено в работах [15–19].

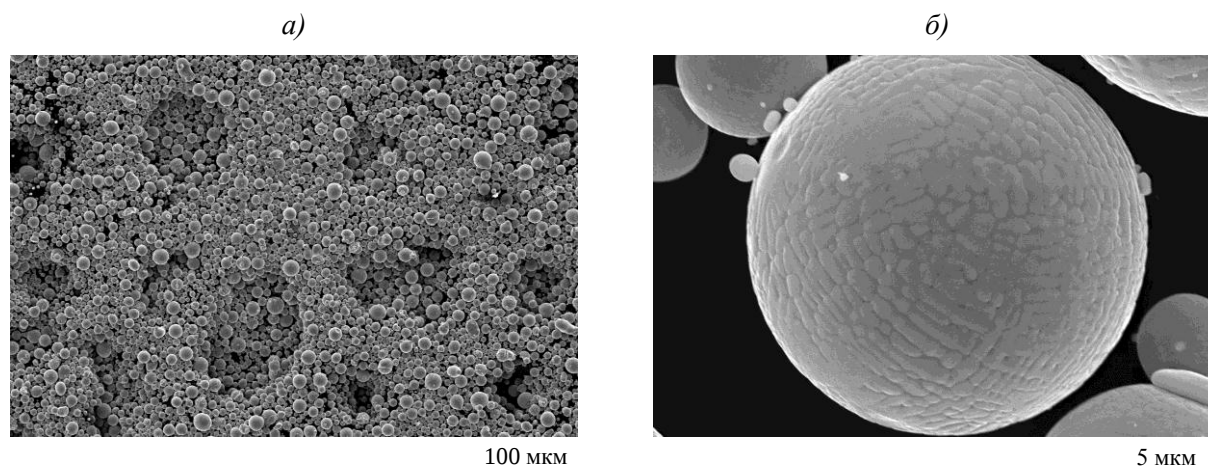


Рис. 2. Микроструктура гранул порошка сплава ЭП648:
а – общий вид ($\times 100$); *б* – структура поверхности ($\times 4000$)

Анализ фракционного состава показал, что количество гранул размером <10 мкм не превышает 5% (рис. 3), что свидетельствует о высокой эффективности предварительно проведенной газодинамической сепарации для удаления особо тонких частиц. Количество частиц размером в пределах 10–20 мкм значительно и составляет $\sim 35\%$, однако это не препятствует нормальному формированию слоя при штатном режиме работы установки селективного лазерного сплавления, а порошок в целом имеет хорошую сыпучесть.

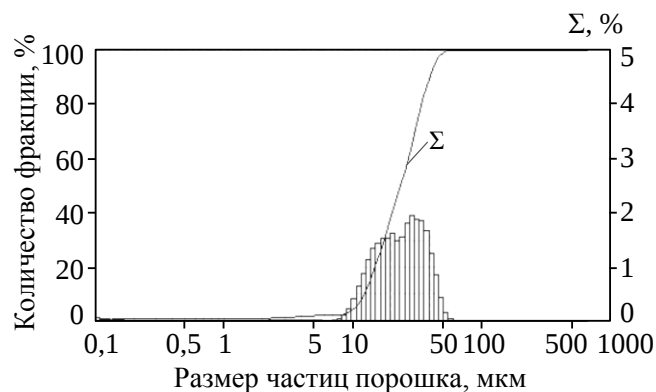


Рис. 3. Фракционный состав порошка сплава ЭП648

По результатам отработки оптимального режима селективного лазерного сплавления была изготовлена партия заготовок образцов квадратного сечения.

Микроструктура SLM-образца представлена на рис. 4, *а*. Хорошо видны ячейки – поперечные срезы сплавленных лазером дорожек (треков). В объеме отдельных треков видны участки диспергированной эвтектики, имеющей сетчато-ячеистую морфологию. Выделения карбидов дисперсные, распределение их неравномерное. При больших уве-

личениях (рис. 4, б) в объеме треков присутствуют дисперсные частицы светлой фазы толщиной ~300 нм.

Проведение стандартной термической обработки приводит к полному растворению ячеистой структуры с формированием стандартной для сплава ЭП648 зеренной структуры. При этом формирующиеся «литые» зерна в металле SLM характеризуются значительно меньшими размерами (3–4 балл) по сравнению с зеренной структурой отливки (1–2 балл – рис. 4, е). Границы зерен декорированы выделениями избыточных фаз (ТПУ фазы, фаза Лавеса, карбиды), что является характерным для этого высокохромистого сплава как в литом, так и в деформированном состоянии (рис. 4, д, е соответственно). Однако сравнение SLM-металла со сплавом, полученным по традиционной технологии, показывает, что в объеме зерна SLM-образца наблюдается большое количество выделений светлой фазы в виде пластин.

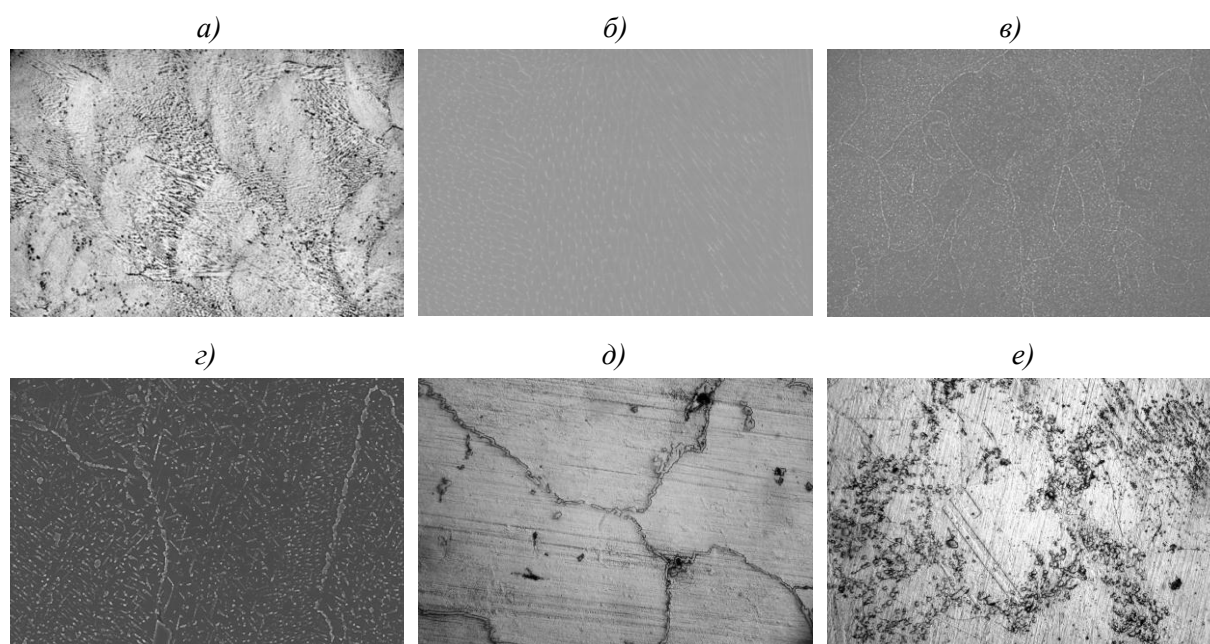


Рис. 4. Микроструктура синтезированных образцов в состоянии SLM (а – $\times 500$, б – $\times 3000$) и после термической обработки (в – $\times 600$, г – $\times 2500$) в сравнении с литым (д – $\times 500$) и деформированным металлом после термической обработки (е – $\times 500$)

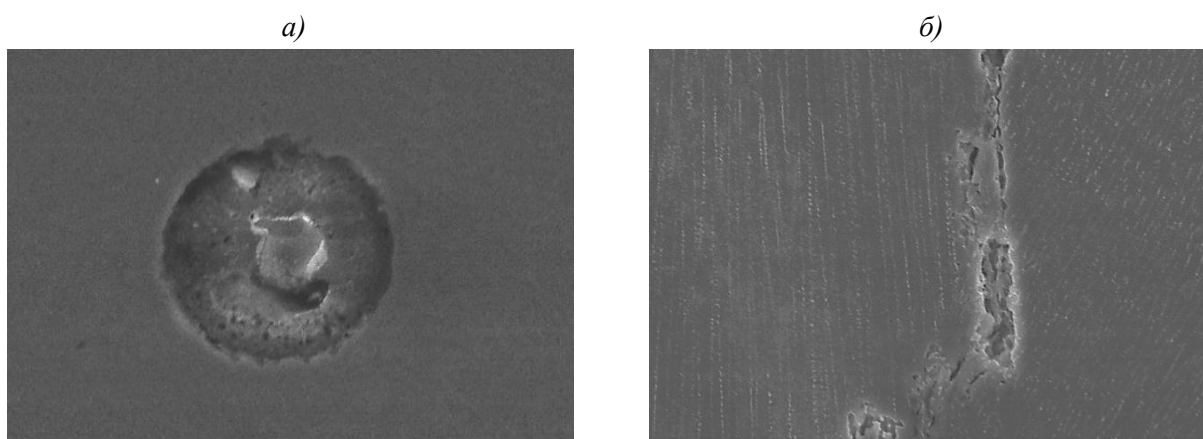
С учетом высокого содержания хрома – элемента, имеющего высокое сродство к азоту, – данные частицы могут быть нитридами, формирование которых обусловлено контактом расплавленного металла с атмосферой азота, в которой происходит построение детали. Размер частиц слишком мал для точного установления их химического состава с помощью микрорентгеноспектрального анализа, однако данный вывод подтверждается повышенным содержанием азота в SLM-металле (0,027%) по сравнению с исходным порошком (0,012%).

Исследование пористости полученных заготовок показало, что средняя объемная доля пор в SLM-металле составляет 0,07%, что соответствует лучшим результатам, полученным при использовании порошков импортного производства [7]. Основные параметры пор представлены в табл. 2. Поры внутри треков имеют преимущественно сферическую (или округлую) форму (рис. 5, а). На отдельных полях зрения (рис. 5, б) отмечается пористость усадочного происхождения, расположенная вдоль линии сплавления треков (вероятно, на границе сплавления отдельных «островков»).

Таблица 2

Сводные данные анализа пористости SLM-металла

Параметр	Значения параметра
Общая концентрация, %	0,0688
Общее количество объектов, шт./мм ²	50,2971
Минимальная концентрация, %	0,0296
Максимальная концентрация, %	0,1220
Минимальное количество объектов, шт./мм ²	23,6913
Максимальное количество объектов, шт./мм ²	85,0350

Рис. 5. Внешний вид (*a* – $\times 6000$, *б* – $\times 5000$) пор в металле в состоянии SLM

Механические свойства синтезированных образцов приведены в табл. 3 в сравнении с литым вариантом сплава после полной термической обработки (ТО). Видно, что пределы прочности и текучести сплава ЭП648 в состоянии SLM находятся близко к верхнему пределу значений (по паспорту) для литого материала, а по относительному удлинению SLM-металл почти в 2 раза превосходит литой. После проведения полной ТО по стандартному режиму предел прочности повышается на $\sim 15\%$, что может быть связано как с более тонкой «литой» структурой, так и с дополнительным нитридным упрочнением металла, синтезированного в среде азота. Пластические характеристики SLM-металла после ТО соответствуют верхнему пределу паспортных значений, даже при некотором снижении значений относительного удлинения по сравнению с SLM-состоянием. Полученные данные хорошо согласуются с результатами, изложенными в работе [7].

Таблица 3

Механические свойства синтезированных образцов сплава ЭП648

Состояние образца	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
	МПа		%	
SLM (N ₂)	840	695	10,4	7
SLM+ТО	965	665	7	8
Литой+ТО*	785–880	585–690	4–7	4–7

* Паспортные характеристики.

Таким образом, можно сделать вывод, что отработанная технология селективного лазерного сплавления обеспечивает получение высокого комплекса механических свойств, а также имеет перспективы для дальнейшего получения деталей из жаропрочных никелевых сплавов с объемным азотированием.

Полученные данные свидетельствуют о возможности скорейшего освоения технологии селективного лазерного сплавления порошков применительно к отечественным порошковым материалам. Подобные технологии требуются для получения деталей из жаростойких сплавов типа «завихритель» и корпусов топливных форсунок. Например, переход к аддитивной технологии производства форсунки позволит изготавливать ее за один технологический цикл, исключив операцию лазерной или аргоно-дуговой сварки и сведя к минимуму последующую механическую обработку.

Однако основным сдерживающим фактором для внедрения аддитивных технологий является отсутствие в стране серийного производства соответствующих порошков и их высокая стоимость. Кроме работы с жаропрочными сплавами интерес представляет также получение деталей методом SLM из легких, в том числе титановых, сплавов. Аддитивные технологии в данном ключе открывают широкие перспективы для повышения весовой эффективности изделий гражданской авиационной техники путем более рационального проектирования без учета ограничений (литейные припуски, галтели, простая форма при обработке давлением и т. п.) традиционных технологий. Переход к так называемому «бионическому» дизайну позволит перейти к новым принципам проектирования авиационной техники.

Снижение стоимости порошков жаропрочных сплавов и получение порошков реактивных металлов (титана, циркония и т. п.) возможны при их получении на высокопроизводительном промышленном атомайзере, а также за счет параллельного извлечения фракций. Так, порошки некоторых наиболее распространенных сплавов могут быть востребованы не только для селективного лазерного сплавления (10–40 мкм), но и для лазерной наплавки (40–80 мкм), что увеличивает выход годного до 70–80%. Наиболее дисперсная часть (<10 мкм) может быть применена в MIM-технологии, что должно дополнительно снизить стоимость порошка.

На тигельных атомайзерах невозможно получение порошков реактивных металлов, что связано с высокими температурами плавления и протеканием химической реакции расплавов с большинством применяемых огнеупорных футеровок. Весьма перспективным является направление, связанное с разработкой нового класса сверхжаропрочных материалов на основе силицида ниобия. Получение деталей из этих сплавов с помощью аддитивного производства является альтернативой классической технологии литья по выплавляемым моделям, особенно с учетом исключительно высокой химической активности расплава и высоких температур (>1800°C). Для решения столь разных задач необходим по-настоящему универсальный атомайзер с бестигельной плавкой электрода. Процесс получения порошков на подобном оборудовании полностью исключает контакт расплава с керамикой (графитом) в процессе распыления и обеспечивает решение еще одной важной проблемы – исключение загрязнения получаемых порошков керамикой.

Наиболее передовым в данной области является оборудование фирмы ALD – атомайзер EIGA 50/500, предназначенный для получения порошков сплавов на основе титана, циркония, никеля, железа при бестигельной плавке электрода $\varnothing 50 \times 500$ мм в коротком индукторе и распылении 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, распыление которой, как правило, загрязняет порошок скрапом и окисленными крупными гранулами, поскольку подача металла на всех этапах распыления идет одинаково, а поток аргона в форсунке формируется до начала плавления электрода.

Выход годного при параллельном извлечении фракций 10–40 мкм и 40–80 мкм, по данным фирмы ALD, составляет для титановых сплавов ~63–65%, а для нержавеющей стали – до 75%, что является весьма высоким показателем по сравнению с другими технологиями распыления.

Заключение

Показано, что порошок сплава ЭП648 производства ВИАМ удовлетворяет всем требованиям для получения деталей методом селективного лазерного сплавления. Наличие ~35% фракции 10–20 мкм не препятствует нормальному формированию слоя и не снижает сыпучести порошка. Применение газодинамической сепарации обеспечивает высокую эффективность удаления наиболее дисперсных частиц (остаточное содержание гранул размером <10 мкм не превышает 5%).

Отработанный режим сплавления порошка сплава ЭП648 обеспечивает получение плотных деталей со средней объемной долей пористости 0,07%, что соответствует лучшим результатам работ с порошками импортного производства.

Технология селективного лазерного сплавления порошка сплава ЭП648 обеспечивает высокий комплекс механических свойств, соответствующий (или превышающий) максимальным паспортным значениям для литого материала.

Показана перспектива применения технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков в среде азота для синтеза деталей из никелевых жаропрочных сплавов с объемным азотированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
6. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
7. Грязнов М.Ю., Шотин С.В., Чувильдеев В.Н. Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316L при послойном лазерном сплавлении //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. №5(1). С. 45–50.
8. Смуров И.Ю., Ядройцев И.А., Мовчан И.А. и др. Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ //Вестник МГТУ «Станкин». 2012. №1(18). С. 36–38.
9. Тарасова Т.В., Назаров А.П. Исследование процессов модификации поверхностного слоя и изготовления трехмерных машиностроительных деталей посредством селективного лазерного сплавления //Вестник МГТУ «Станкин». 2013. №2(25). С. 17–25.
10. Тринева Т.Л. Технологический процесс изготовления литейной оснастки из композитного материала методом селективного лазерного спекания //Процессы литья. 2012. №1(91). С. 31–35.
11. Techel A. et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing/>

12. Louvis E. et al. Selective laser melting of aluminium components //Journal of Materials Processing Technology. 2011. V. 211 №2. P. 275–284.
13. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов /В кн.: Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина /Под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука. 2006. С. 56–78.
14. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 3–7.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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. 2014. №5. Ст. 04 (viam-works.ru).
19. 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. 2014. №3. Ст. 01 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. 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] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 36–52.
3. 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”»] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. S. 6–8.
4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Prioritetnye napravlenija razvitija tehnologij proizvodstva zharoprochnyh materialov dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [Priority areas for the development of production technology of high-temperature materials for aircraft engine] //Problemy chernoj metallurgii i materialovedenija. 2013. №3. S. 47–54.
5. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij ukklad [Sixth technological way] //Наука и жизнь. 2010. №4. S. 2–7.
6. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennyh zharoprochnyh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [The creation of modern high-temperature materials and production technologies for aviation engine] //Kryl'ja Rodiny. 2012. №3–4. S. 34–38.
7. Grjaznov M.Ju., Shotin S.V., Chuvil'deev V.N. Jeffekt mezostrukturnogo uprochnenija stali 316L pri poslojnom lazernom splavlennii [Effect mesostructural hardening steel 316L in stratified laser fusion] //Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. 2012. №5(1). S. 45–50.

8. Smurov I.Ju., Jadrojev I.A., Movchan I.A. i dr. Additivnoe proizvodstvo s pomoshh'ju lazera. Provedenie jeksperimental'nyh rabot [Additive manufacturing a laser. Experimental works] //Vestnik MGTU «Stankin». 2012. №1(18). S. 36–38.
9. Tarasova T.V., Nazarov A.P. Issledovanie processov modifikacii poverhnostnogo sloja i izgotovlenija trehmernyh mashinostroitel'nyh detalej posredstvom selektivnogo lazernogo splavljenja [Investigation of processes of modification of the surface layer and fabrication of three-dimensional engineering components by selective laser melting] //Vestnik MGTU «Stankin». 2013. №2(25). S. 17–25.
10. Trineva T.L. Tehnologicheskij process izgotovlenija litejnoj osnastki iz kompozitnogo materiala metodom selektivnogo lazernogo spekanija [Manufacturing process of casting tooling of composite material by selective laser sintering] //Processy lit'ja. 2012. №1(91). S. 31–35.
11. Techel A. et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing/>
12. Louvis E. et al. Selective laser melting of aluminium components //Journal of Materials Processing Technology. 2011. V. 211 №2. P. 275–284.
13. Kablov E.N., Petrushin N.V. Komp'juternyj metod konstruirovaniya litejnyh zharoprochnykh nikelovykh splavov [Computer method for the construction of the casting heat-resistant nickel alloys] /V kn.: Litejnye zharoprochnye splavy. Jeffekt S.T. Kishkina /Pod red. E.N. Kablova. M.: Nauka. 2006. S. 56–78.
14. Gorjunov A.V., Rigin V.E. Sovremennaja tehnologija poluchenija litejnyh zharoprochnykh nikelovykh splavov [Modern technology of production of heat-resistant nickel alloys casting] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 3–7.
15. Ospennikova O.G., Evgenov A.G., Nerush S.V., Afanas'ev-Hodykin A.N. Issledovanie melkodispersnykh poroshkov pripoev na nikelевой osnove primenitel'no k polucheniju vysokotehnologichnogo polufabrikata v vide samoklejushhejsja lenty na organicheskom svjazujushhem [The study melkodispersnykh solder powder on the basis of nickel in relation to the preparation of high-tech semi-finished products in the form of self-adhesive tape on the organic binder] //Vestnik UGATU. 2012. №5 (50). S. 137–144.
16. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N. Issledovanie melkodispersnykh poroshkov pripoev dlja diffuzionnoj vakuumnoj pajki, poluchennykh metodom atomizacii rasplava [Investigation of fine solder powder to diffusion vacuum brazing obtained by the melt atomization] //Vestnik MGTU im. N.Je. Bauman. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 79–87.
17. Nerush S.V., Evgenov A.G., Ermolaev A.S., Rogalev A.M. Issledovanie melkodispersnogo metallichesko go poroshka zharoprochnogo splava na nikelевой osnove dlja lazernoj LMD naplavki [Investigation fine metal powder superalloy based on nickel for laser welding LMD] //Voprosy materialovedenija. 2013. №4(76). S. 98–107.
18. Evgenov A.G., Nerush S.V., Vasilenko S.A. Poluchenie i oprobovanie melkodispersnogo metallichesko go poroshka vysokohromistogo splava na nikelевой osnove primenitel'no k lazernoj LMD-naplavke [Preparation and testing of a fine metal powder high-chromium nickel-based alloy with respect to the laser LMD-surfacing] //Trudy VIAM. 2014. №5. St. 04 (viam-works.ru).
19. Nerush S.V., Evgenov A.G. Issledovanie melkodispersnogo metallichesko go poroshka zharoprochnogo splava marki JeP648-VI primenitel'no k lazernoj LMD-naplavke, a takzhe ocenka kachestva naplavki poroshkovogo materiala na nikelевой osnove na rabochie lopatki TVD [The study of the fine metal powder superalloy EP648 brand-VI with respect to the laser LMD-surfacing, as well as evaluation of the quality of the powder material deposition on nickel-based on the HPT rotor blades] //Trudy VIAM. 2014. №3. St. 01 (viam-works.ru).