



УДК: 669.14:621.833

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1

**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**

С.В. Неруш

А.Г. Евгенов

кандидат технических наук

Март 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:669.14:621.833

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1

С.В. Неруш, А.Г. Евгенов

**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**

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. Проведена оценка качества наплавки крайних гребешков на бандажной полке рабочих лопаток второй ступени турбины высокого давления (ТВД). Адаптивная лазерная LMD-наплавка с применением металлического порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм по отработке технологии восстановления геометрии крайних гребешков на бандажной полке рабочих лопаток второй ступени гарантирует высокое качество наплавленного материала (наличие дефектов типа микротрещин и непроваров не выявлено), а также восстановление геометрии в полном объеме.

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

S.V. Nerush, A.G. Evgenov

**RESEARCH OF FINE-DISPERSED METAL POWDER OF THE HEAT RESISTING
ALLOY OF THE EP648-VI BRAND FOR LASER METAL DEPOSITION (LMD)
AND ALSO THE ASSESSMENT QUALITY OF WELDING OF POWDER MATERI-
AL ON THE NICKEL BASIS ON WORKING BLADES THP**

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 HERMIGA 10/100 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, working blades.*

Введение

В процессе эксплуатации в составе авиационного двигателя детали – в частности рабочие лопатки турбины высокого давления (ТВД) – испытывают вибрации и удары, подвергаются абразивному износу, воздействию высоких температур и прочих негативных факторов, что приводит к образованию трещин, забоин [1–5]. Ввиду дороговизны большинства деталей авиационного двигателя ремонт представляется перспективным направлением. В настоящее время Россия отстает от компаний западных стран в этой области, и поэтому актуальной задачей является разработка технологии ремонта деталей авиационного двигателя.

Решение данной проблемы возможно с применением лазерной газопорошковой наплавки – LMD (Laser Metal Deposition) [6]. Этот процесс крайне привлекателен для ремонта важнейших деталей в авиастроении, ремонта 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.

Существует несколько LMD-процессов, но в их основе лежит один принцип: сфокусированный лазерный луч направляется на порошок, происходит его плавление и постепенное создание детали слой за слоем (послойно). 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. Существует также возможность сэкономить время за счет сокращения количества технологических операций.

Наплавка LMD особенно целесообразна для сложных деталей малых и средних размеров. Наиболее успешное применение данная технология находит в медицине и стоматологии – например, для слуховых аппаратов, ортопедических имплантатов и зубных протезов. Перспективными областями применения являются нефте- и газодобывающая промышленность, автомобилестроение, изделия военной, морской техники и ювелирные изделия.

Обработка авиационных деталей с помощью LMD может быть очень выгодна, так как изготовление новой детали стандартным способом может оказаться в 20 раз дороже.

Очень трудно спрогнозировать свойства детали, выполненной с помощью LMD-наплавки, так как в процесс вовлечено много переменных величин. Для достижения постоянных свойств наплавленных деталей требуется знание и понимание изменений микроструктуры и свойств материала, а также необходима база данных по свойствам исходного материала.

В качестве исходного материала для LMD-наплавки широко используются мелкодисперсные металлические порошки сплавов на различной основе [7]. 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 [8].

Получение металлических порошков такого высокого качества с высоким выходом годного может быть обеспечено при изготовлении на современном оборудовании методом атомизации – распылении расплава инертным газом [9]. 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.

Данная работа посвящена исследованию мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе марки ЭП648-ВИ, изготовленного методом атомизации, для лазерной LMD-наплавки (гранулометрического состава, содержания газовых примесей, микроструктуры поверхности частиц порошка, наличия пористых гранул), а также оценке качества наплавки порошкового материала на рабочие лопатки ТВД.

Методика проведения исследований

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 [10]. Поверхность исходной заготовки предварительно подвергали пескоструйной обработке. Распыление жидкого металла вели холодным и подогретым до 450°C 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 Analizzate 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 CS0600 и TC-600 фирмы Leco 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 изготовляли 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 плотности, которая для пористых гранул всегда меньше, чем для плотных. Эффективность сепарации оценивали на шлифах поперечных срезов гранул.

Микроструктуру поверхности гранул, поперечных срезов шлифов гранул, наплавленных дорожек и поперечных микрошлифов из рабочих лопаток исследовали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840.

Измерение твердости наплавленного материала, зоны термического влияния (ЗТВ) и основы проводили с помощью твердомера AFFRI 251 VRSD.

Экспериментальную LMD-наплавку крайних гребешков проводили на бандажных полках рабочих лопаток второй ступени ТВД при помощи специализированного оборудования TruLaser Cell 7020 в ОАО «Авиадвигатель».

Результаты исследований и их обсуждение

На гранулометрический состав получаемого порошка основное влияние оказывают технологические параметры процесса атомизации (схематично представлены на рис. 1) [11]. К ним относятся:

– параметры, определяющие «расход» жидкого металла (избыточное давление над зеркалом расплава и диаметр проходного сечения подогреваемой керамической трубки, через которую происходит слив расплава);

– давление распыляющего газа;

– температура распыляющего газа;

– температура расплава.

Исследован фракционный состав трех плавов, выполненных при различных давлениях и температурах распыляющего газа. Кумулятивные кривые, отражающие фракционный состав порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ, представлены на рис. 2. Основными факторами, влияющими на фракционный состав получаемых порошков, являются давление и температура распыляющего газа. Основная фракция при распылении как холодным, так и горячим газом: 40–80 мкм. При переходе на распыление горячим газом уменьшение среднего диаметра частиц происходит главным образом за счет фракции 20–10 мкм (ее содержание увеличивается с 9,9 до 16,3%), при этом содержание фракции 40–80 мкм увеличивается с 31,2 до 39,9%, а количество образующейся не годной фракции порошка (+200 мкм) уменьшается с 9,4 до 2,5%. Процент пылевой фракции (менее 10 мкм) при распылении горячим газом увеличивается незначительно. При распылении холодным газом средний диаметр частиц d_{50} (50% получаемого по-

рошка) составляет 75–60 мкм, а распыление горячим газом позволяет получить d_{50} , равный 50 мкм.

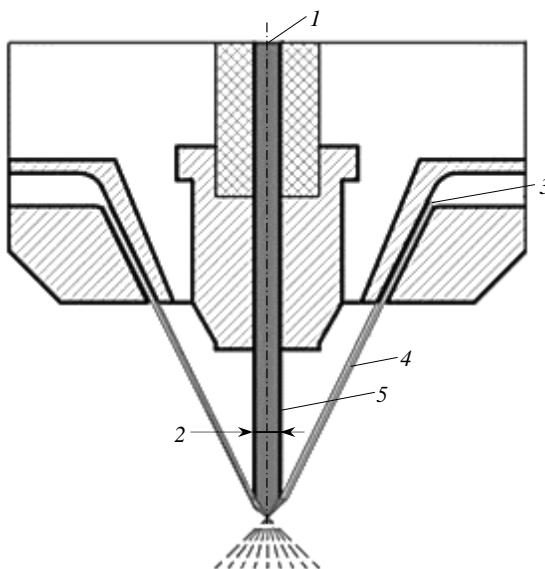


Рисунок 1. Технологические параметры процесса атомизации: 1 – избыточное давление над расплавом; 2 – диаметр проходного сечения керамической трубки; 3 – давление распыляющего газа; 4 – температура распыляющего газа; 5 – температура расплава

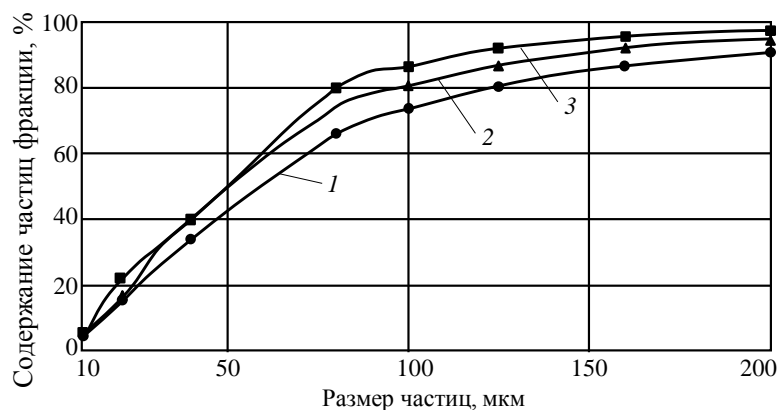


Рисунок 2. Фракционный состав порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ при распылении холодным (1, 2) и горячим газом (3)

Исследование структуры поверхности гранул сплава ЭП648-ВИ показало, что все гранулы имеют выраженную дендритную структуру во всем диапазоне гранулометрического состава и сферическую форму (рис. 3, а), однако для них характерно большое количество образующихся дефектов – сателлитов (рис. 3, 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 кристаллизуясь, бомбардируют более крупные, частично закристаллизованные гранулы, имеющие меньшую начальную скорость. Количество дефектных гранул увеличивается с увеличением размеров частиц. При исследовании порошков припоев [12–14] 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.

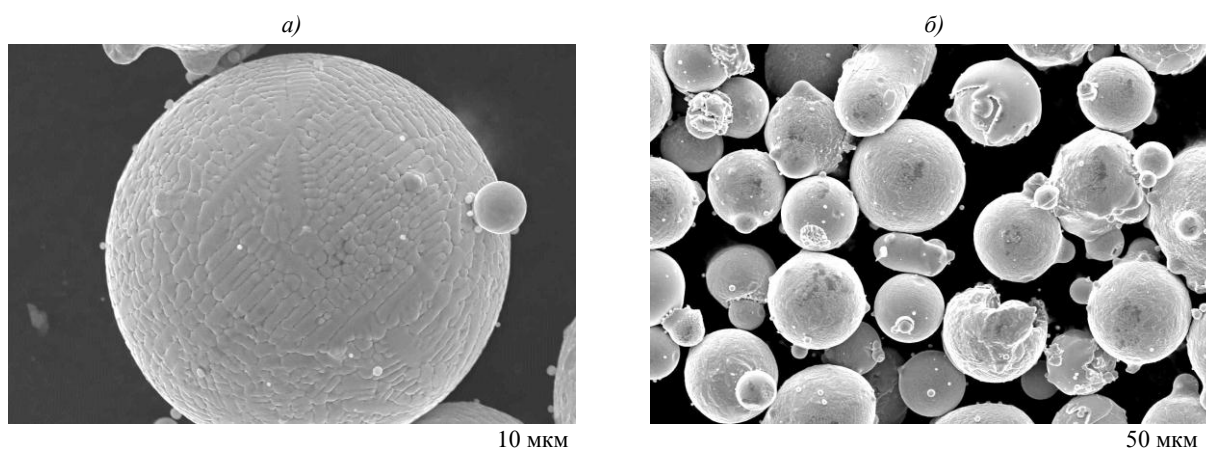


Рисунок 3. Микроструктура (*a* – $\times 1500$; *б* – $\times 500$) поверхности гранул порошка сплава ЭП648-ВИ

Распыление горячим газом приводит, помимо уменьшения среднего размера частиц, к уменьшению количества дефектных гранул (рис. 4, *б*) по сравнению с распылением холодным газом (рис. 4, *а*), что связано с большей начальной скоростью газового потока на выходе из форсунки и большим 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.

При применении металлических порошков в лазерной LMD-наплавке наличие сателлитов не имеет практического значения. Значительно большее значение на качество наплавки оказывает внутренняя пористость в гранулах, полученных при распылении аргоном. Согласно литературным данным [15, 16], 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 локаль-

ный объем аргона может быть изолирован внутри гранулы. По данным работы [17], 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 [18].

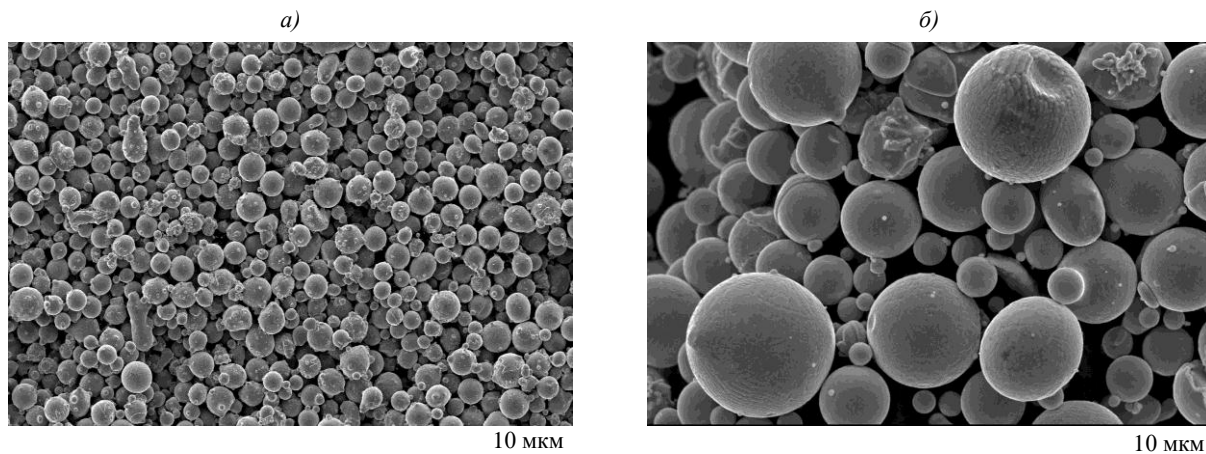


Рисунок 4. Микроструктура гранул порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ при распылении холодным (*a* – $\times 100$) и горячим газом (*б* – $\times 1000$)

Перед тем как проводить обработку наплавки крайних гребешков на бандажной полке рабочих лопаток второй ступени ТВД методом LMD на лазерном центре Tru-Laser Cell 7020 в ОАО «Авиадвигатель» проводили экспериментальную наплавку полученного порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ на поверхность плоского листа (рис. 5, *a*). На рис. 5, *б* представлена микроструктура образцов наплавленного материала на плоский лист. Видно, что в наплавленном материале присутствуют поры округлой формы. Объемная доля пор на площади $1 \times 1 \text{ см}^2$ составляет от 1 до 2%. Размер пор достигает 70 мкм, что негативно сказывается на качестве наплавляемого материала (образование микротрещин, несплавления).

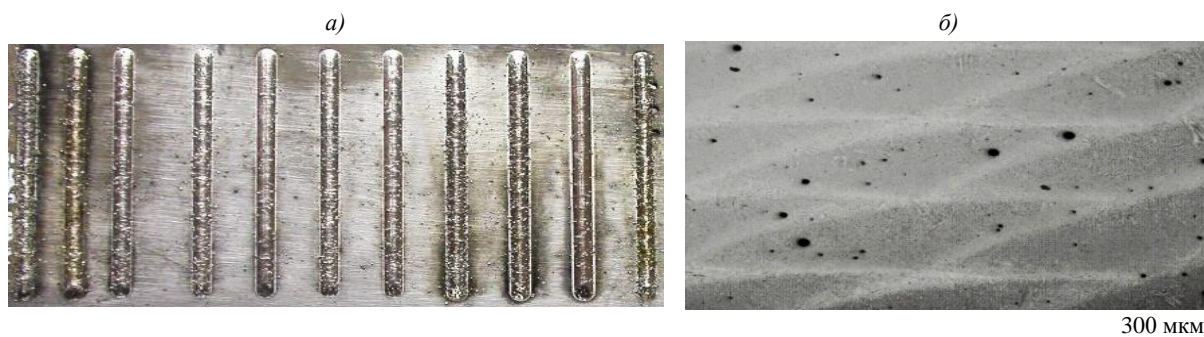


Рисунок 5. Поверхность плоского листа с наплавкой порошком сплава ЭП648-ВИ (*a*) и микроструктура наплавки (*б*)

Вследствие этого необходимо провести 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 (рис. 6, *а*, *б*), 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 (рис. 6, *в*, *г*).

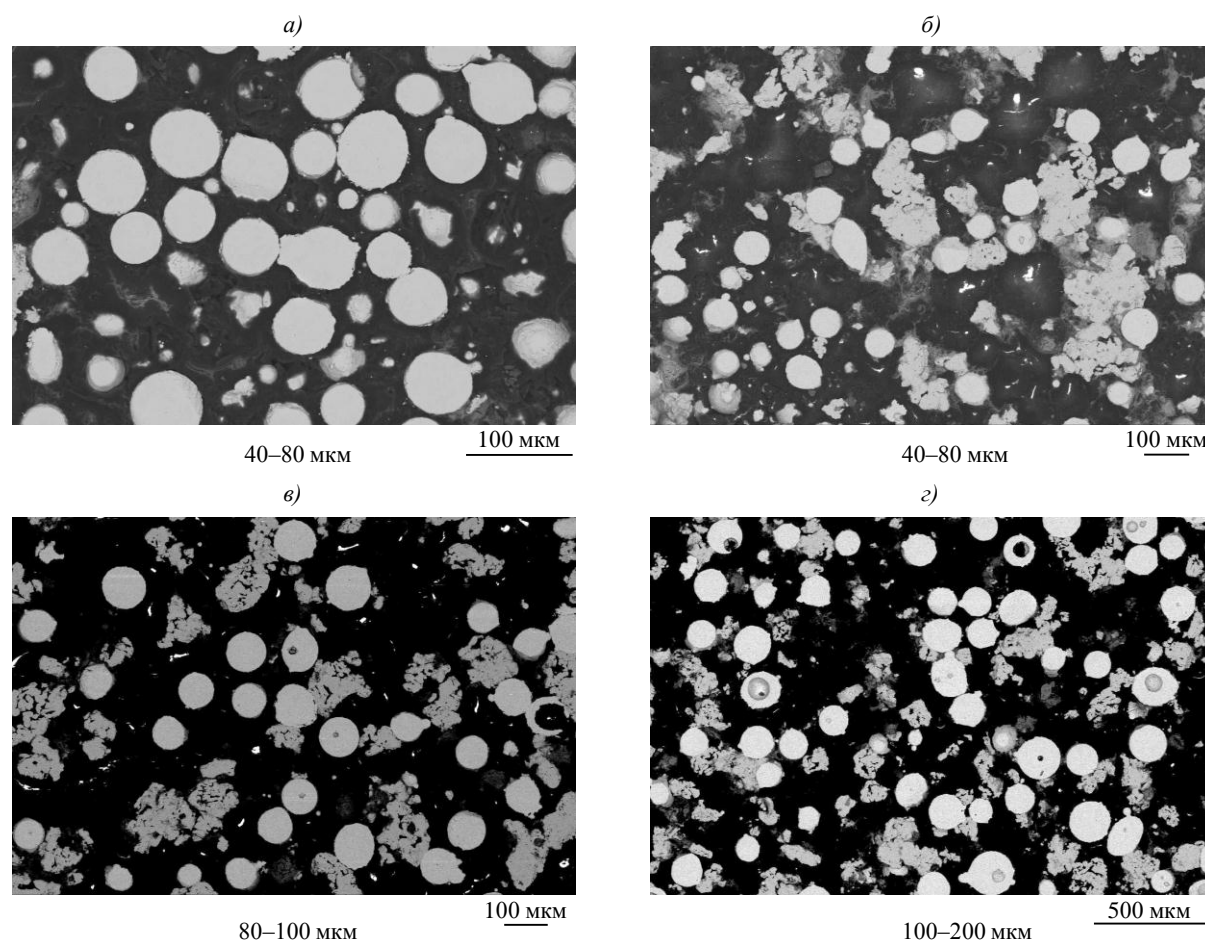


Рисунок 6. Микроструктура поперечных срезов гранул жаропрочного сплава ЭП648-ВИ по фракциям (*а* – $\times 250$; *б*, *в* – $\times 100$; *г* – $\times 50$)

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. 7, *а*). При исследовании отделенных (так называемых «тяжелых») частиц порошка пористых гранул не обнаружено (рис. 7, *б*).

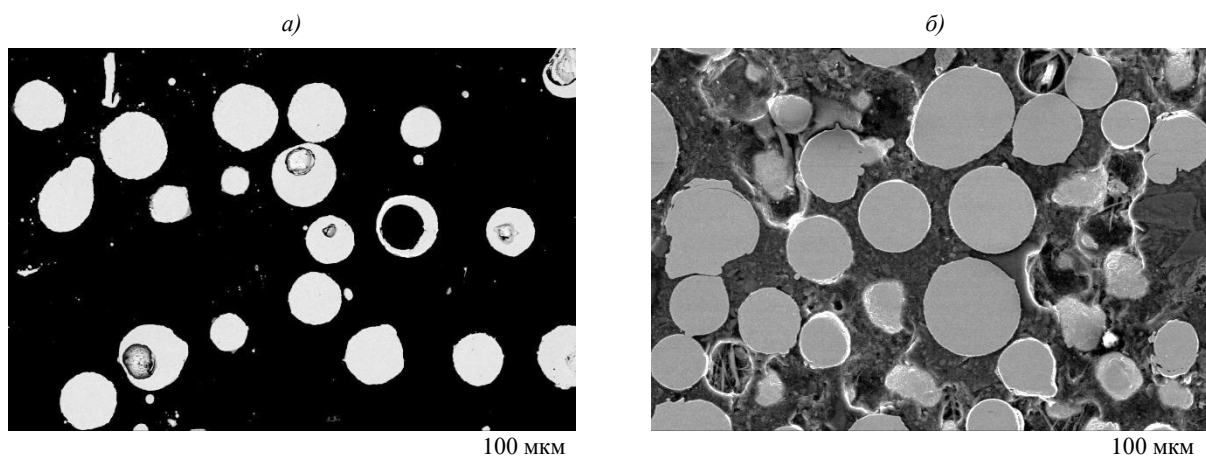


Рисунок 7. Микроструктура поперечных срезов «тяжелых» ($a - \times 100$) и «легких» гранул ($b - \times 150$) порошков жаропрочного сплава ЭП648-ВИ после газодинамической сепарации в классификаторе

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 $\sim 0,02\%$, однако следует отметить, что в данном случае дело не только в растворенном в металле, но и в адсорбированном поверхностью частиц порошка кислороде. Для определения истинного содержания кислорода в тонких порошках необходима специальная методика проведения газового анализа, которая позволила бы отделить кислород, содержащийся в оксидах, от кислорода, адсорбированного поверхностью гранул. 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). Для сравнения по данным работы [19] при газоструйном распылении порошка припоя на никелевой основе марки ВПр11 для фракции 40–120 мкм значения содержания кислорода составляют 0,030–0,024%.

Адаптивная лазерная LMD-наплавка

Полученный мелкодисперсный металлический порошок жаропрочного сплава ЭП648-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм после газодинамической сепарации (отделения пористых гранул) применен при наплавке крайних гребешков на бандажные полки рабочих лопаток второй ступени ТВД методом LMD на лазерном центре TruLaser Cell 7020 в ОАО «Авиадвигатель». В качестве объекта исследования использовались рабочие лопатки второй ступени ТВД (рис. 8). Проведен микроанализ на поперечных и продольных микрошлифах, вырезанных из

крайних гребешков. Глубина зоны термического влияния (ЗТВ) составляет от 0,10 до 0,15 мм. Микроструктура в зоне наплавки дендритная. Микроструктура основного материала лопатки представляет собой: γ -твердый раствор+ γ' упрочняющая фаза+($\gamma+\gamma'$) эвтектическая фаза+карбиды.

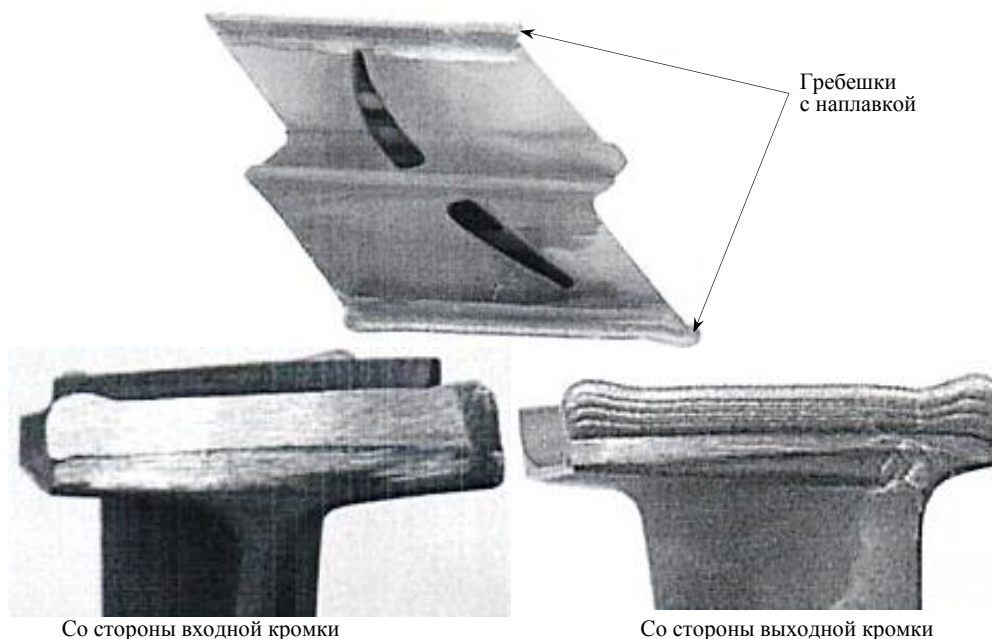


Рис. 8. Внешний вид бандажной полки лопатки второй ступени ТВД с наплавкой крайних гребешков

Высота наплавки составляет от 2,5 до 3,3 мм. Наплавленный материал на обоих гребешках плотный, имеются единичные внутренние поры размером от 0,01 до 0,07 мм, что не превышает норм ТУ. Неметаллических включений, несплавлений не имеется.

Проведен анализ измерения микротвердости наплавки, ЗТВ и основного материала. Микротвердость (HV) материала составила:

Место измерения	Значения HV
Наплавка	306–326
ЗТВ	370–461
Основа	370–391.



Рисунок 9. Микроструктура в зоне наплавки гребешков рабочих лопаток

В результате контроля наплавленного материала (рис. 9) видно – между основным материалом и материалом наплавки имеется четкая граница раздела, на границе раздела дефектов типа трещин и непроваров не выявлено, что свидетельствует о высоком качестве порошкового материала. Материал наплавки плотный.

Заключение

Разработанная технология получения порошка из жаропрочного сплава ЭП648-ВИ методом атомизации обеспечивает наиболее высокий выход годного по фракции 40–80 мкм (на уровне 30–40%) в сравнении с существующими в РФ технологиями получения металлических порошков. При распылении подогретым до 450°C газом сокращается количество дефектных гранул – сателлитов – по сравнению с распылением холодным газом. При этом содержание кислорода в порошках увеличивается незначительно – в интервале от 0,007 до 0,01% и не превышает 0,02% даже в самых тонких частицах размером <10 мкм.

В результате процесса атомизации образуются пористые гранулы, приводящие к снижению уровня качества наплавленного материала. Технология газодинамической сепарации позволяет отделить пористые гранулы от плотных, но для повышения качества наплавки необходима создание нормативной документации, регламентирующей пористость гранул порошка, и оптимизация технологии получения металлических порошков для лазерной LMD-наплавки.

Адаптивная лазерная LMD-наплавка, выполненная с применением металлического порошка жаропрочного сплава ЭП648-ВИ гранулометрического состава 40–80 мкм после газодинамической сепарации (отделения пористых гранул), применялась при наплавке крайних гребешков на бандажной полке рабочих лопаток второй ступени ТВД. Геометрия крайних гребешков на бандажной полке рабочих лопаток второй ступени ТВД восстановлена в полном объеме. Высота наплавки составляет 2,5–3,3 мм. В материале наплавки дефектов типа трещин и непроваров не выявлено, что свидетельствует о высоком качестве порошкового материала. Материал наплавки плотный. Ширина зоны термического влияния составляет 0,10–0,15 мм. Микротвердость материала в зонах: наплавки составляет 306–326 HV; ЗТВ: 370–461 HV; в основе – 370–391 HV.

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. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Василенок Л.Б., Морозова Г.И. Рений в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин (продолжение) //Материаловедение. 2000. №3. С. 38–43.

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. №S. 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. 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. 36–51.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Лыков П.А., Бромер К.А., Роцин 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.
12. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, получен-

- ных методом атомизации расплава //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». С. 79–87.
13. Оспенникова О.Г., Евгенов А.Г., Неруш С.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев на никелевой основе применительно к получению высокотехнологичного полуфабриката в виде самоклеящейся ленты на органическом связующем //Вестник УГАТУ. 2012. №5 (50). С. 137–144.
 14. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и технологических покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–35.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Аношкин Н.Ф., Ходкин В.И., Рытов Н.Н. Разработка и внедрение технологии производства гранул высокотемпературных припоев методом струйного распыления для пайки деталей из никелевых сплавов /В сб. статей «Металлургия гранул». Вып. 1. М.: ВИЛС. 1983. С. 127–134.

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”»] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Vasilenok L.B., Morozova G.I. Renij v zharoprochnyh nikelevyh splavah dlja lopatok gazovyh turbin (prodolzhenie) [Measurements in high-

- temperature nickel alloys for gas turbine blades (continued)] //Materialovedenie. 2000. №3. S. 38–43.
3. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikel'evye splavy dlja detalej gazoturbinyh dvigatelej [High-temperature heat-resistant nickel alloys for turbine engine parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 52–57.
 4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhij 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. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–51.
 6. Nerush S.V., Evgenov A.G. Proizvodstvo poroshkov pripoev i gotovyh polufabrikatov na ih osnove, a takzhe poroshkov zharoprochnykh splavov i stalej dlja additivnykh 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Evgenov A.G., Nerush S.V. Tehnologija poluchenija poroshkov i polufabrikatov pripoev, issledovanie melkodispersnykh poroshkov pripoev dlja diffuzionnoj vakuumnoj pajki, poluchennykh 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-tehnicheskoi konferencii molodykh specialistov. Ufa: UMPO. 2011. S. 159–162.
 10. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovykh zagotovok iz litejnykh zharoprochnykh splavov novogo

- pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.
11. 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 Juzh-no-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Metallurgija». 2011. Vyp. 14. S. 17–19.
 12. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N. Issledovanie melkodispersnyh poroshkov pripoev dlja diffuzionnoj vakuumnoj pajki, poluchennyh metodom atomizacii rasplava [Investigation of fine powders of alloys, diffusion vacuum brazing, obtained by atomization of the melt] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. 2011. Spec. vyp. «Perspektivnye konstrukcionnye materialy i tehnologii». S. 79–87.
 13. Ospennikova O.G., Evgenov A.G., Nerush S.V., Afanas'ev-Hodykin A.N. Issledovanie melkodispersnyh poroshkov pripoev na nikelevoj osnove primenitel'no k polucheniju vysokotehnologichnogo polufabrikata v vide samoklejashhejsja lenty na organicheskom svjazujushhem [Investigation of fine solder powder nickel-based high-tech applied to obtain a semi-self-adhesive tape on the organic binder] //Vestnik UGATU. 2012. №5 (50). S. 137–144.
 14. 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. 19–35.
 15. Lykov P.A., Roshhin V.E., Vorob'ev E.I. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov raspylenija 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.
 16. 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.
 17. Safronov V.P., Rytov N.N., Jeskin G.I., Solujanov Ju.F. Sovershenstvovanie tehnologii gazostrujnogo raspylenija rasplava [Improving technology gas-jet spray melt] /V sb. statej «Metallurgija granul». Vyp. 1. M.: VILS. 1983. S. 59–63.

18. Anuchin P.S., Shherbakov A.I., Kalicev V.A. i dr. Osobennosti proizvodstva zharo-prochnykh poroshkovykh pripoev [Features production of heat-resistant powder solders] /V sb. statej «Metallurgija granul». Vyp. 1. M.: VILS. 1983. S. 154–159.
19. Anoshkin N.F., Hodkin V.I., Rytov N.N. Razrabotka i vnedrenie tehnologii proizvodstva granul vysokotemperaturnykh pripoev metodom strujnogo raspylenija dlja pajki detalej iz nikelovykh splavov [Development and implementation of high-temperature solder pellet production by spray jet soldering parts of nickel alloys] /V sb. statej «Metallurgija granul». Vyp. 1. M.: VILS. 1983. S. 127–134.