

УДК 621.762:669.24

А.М. Волков¹, А.А. Шестакова¹, М.М. Бакрадзе¹

СРАВНЕНИЕ ГРАНУЛ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ГАЗОВОЙ АТОМИЗАЦИИ И ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК, С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВ ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19

Описаны различные характеристики гранул, используемых для производства дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов. Рассмотрены различия в технологических свойствах (гранулометрический состав, текучесть и плотность утряски) и структуре (карбидные фазы, пористость) гранул при газовой атомизации и центробежном распылении. Приведены особенности, которые существенно влияют на процесс производства заготовок дисков ГТД. Обоснованы подходы по использованию каждого вида гранул для определенного технологического маршрута изготовления.

Ключевые слова: заготовка диска, ГТД, гранула, атомайзинг, PREP, жаропрочный никелевый сплав, микроструктура.

А.М. Volkov¹, А.А. Shestakova¹, М.М. Bakradze¹

THE COMPARISON OF POWDER PRODUCED BY GAS ATOMIZATION AND BY PLASMA ROTATE ELECTRODE PROCESS IN THE POINT OF PRODUCTION DISK BILLETS FROM Ni-BASE SUPERALLOYS

Various characteristics of powders used for jet-engine disk production from Ni-base superalloys are described. The differences in technological properties (granulometric composition, flowability, tap density) and in structure (carbide phases, porosity) are reviewed. The features which affect significantly on the production process of jet-engine disk billets are cited. The approaches to using each type of powder for the certain technological route are grounded.

Keywords: disk billet, jet-engine, powder, atomizing, PREP, Ni-base superalloy, 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

Использование методов порошковой металлургии для изделий авиационной техники позволяет не только повысить экономические показатели производства, но и применять новые высоколегированные сплавы для ответственных изделий [1]. Для высоконагруженных дисков газотурбинных двигателей (ГТД) используют гранулы жаропрочных никелевых сплавов, полученные в основном двумя методами [2, 3].

Метод газовой атомизации или газоструйного распыления (англоязычный термин – atomizing) основан на том, что расплав металла сливают тонкой струей (~2 мм) через форсунку, в которой происходит разбиение струи сплава инертным газом – например, аргоном под давлением порядка 50 ат (~5 МПа) [4]. Для дисковых сплавов

данный метод получил широкое распространение за рубежом: в США (General Electric, Honeywell и др.), Великобритании (Rolls-Royce PLC), Франции (Onera/Snecma) и т. д. [5, 6].

Другой метод, в большей степени распространенный именно в России, – метод плазменной плавки и центробежного распыления литых быстровращающихся заготовок – PREP (англоязычный термин – plasma rotate electrode process). Этот метод основан на локальном оплавлении прутка, вращающегося с высокой скоростью вокруг горизонтальной оси, торец которого нагревается дуговым плазмотроном. Технология опробована и внедрена в производство на жаропрочных никелевых сплавах типа ЭИ698П, ЭП741НП, ЭП962П, ЭП975П, новых сплавах класса ВВП и др. [7]. Определенное развитие данный метод получил в КНР, что связано с большим опытом научно-технической кооперации России и КНР. Работы проводятся на сплавах класса FGH, являющихся аналогами серийных сплавов: сплав FGH4095 близок по своему химическому составу сплаву Rene 95, FGH4096 – Rene 88DT, FGH4097 – ЭП741НП, FGH4098 – Me3 [8].

Для современных установок распыления выход годных гранул из шихты, загружаемой в печь для вакуумной индукционной плавки (ВИП), по отношению к готовым гранулам жаропрочных никелевых сплавов фракционного состава <70 мкм составляет ~50% для обоих методов распыления. При уменьшении фракции гранул этот показатель при прочих равных условиях будет выше для метода газовой атомизации, при увеличении размера гранул – для центробежного распыления [9].

Кроме того, немаловажным является тот факт, что в методе газовой атомизации расход аргона составляет ~1 кг на 1 кг распыляемого металла. Для центробежного распыления литых заготовок эта величина меньше на два порядка, т. е. двух стандартных баллонов гелия 40 л/200 ат и одного аналогичного баллона аргона может хватить на производство 5000–10000 кг гранул и более [10]. Стоимость гранул тем не менее сопоставима. Связано это с тем, что для центробежного распыления прутки должны быть отшлифованы с высокой точностью и не иметь центральной осевой пористости. Для газовой атомизации допустимо использовать слитки после ВИП с минимальным объемом механической обработки (отрезка литниковой и донной частей, местная зачистка) или вести распыление непосредственно после выплавки сплава из шихты, если это позволяет используемое оборудование.

Однако это не все различия рассматриваемых методов. Гранулы отличаются по своим технологическим свойствам, структуре и т. д. Более углубленному изучению данных особенностей применительно к производству заготовок дисков ГТД и посвящена данная статья. Безусловно, подобные исследования проводились и ранее [11], однако анализировались гранулы фракций: -315+50, -200+50 мкм. Полученные результаты целесообразно актуализировать с учетом развития производственной базы, исследовательских методик, а также перехода на более мелкие фракции.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

Материалы и методы

Для работы использовали данные по различным дисковым жаропрочным никелевым сплавам системы Ni–Co–Cr–W–Al–Mo–Nb–Ti–Ta–Hf–C, разработанным во ФГУП «ВИАМ». Исходные слитки получали методом ВИП. Гранулы газовой атомизации производили на установке HERMIGA 10/100 VI, гранулы центробежного распыления литых заготовок – на установке УЦР-4. Во втором случае заготовки под распыление изготавливали из слитков ВИП с последующим вакуумным дуговым переплавом (ВДП) и шлифованием. Для анализа использовали фракцию 10–100 мкм – для гранул газовой атомизации и -100 мкм – для гранул центробежного распыления.

Гранулометрический состав определяли на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц, содержание кислорода – методом восстановительного плавления в потоке аргона. Гранулы исследовали с применением оптического микроскопа Olympus GX-51 и сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU 8010. Качественный состав карбидных фаз определяли методом локального рентгеновского спектрального микроанализа (МРСА) с использованием детектора X-Max фирмы Oxford Instruments.

Текучесть порошка определяли с помощью воронки Холла с диаметром отверстия 2,5 мм по ГОСТ 20899–98; насыпную плотность гранул – по ГОСТ 19440–94 с использованием метода воронки; плотность утряски – по ГОСТ 25279–93.

Результаты и обсуждение

Типичный гранулометрический состав для исследованных методов производства гранул представлен на рис. 1. Гранулы при газовой атомизации имеют больший разброс по размерам – фактически от 7 до 125 мкм, гранулы при центробежном распылении литых заготовок – от 30 до 125 мкм. Незначительная закрупненность, т. е. присутствие фракции 100–125 мкм, объясняется погрешностью изготовления сит и возможной деформацией ячеек ситового полотна. В целом данный показатель находится в допустимых пределах.

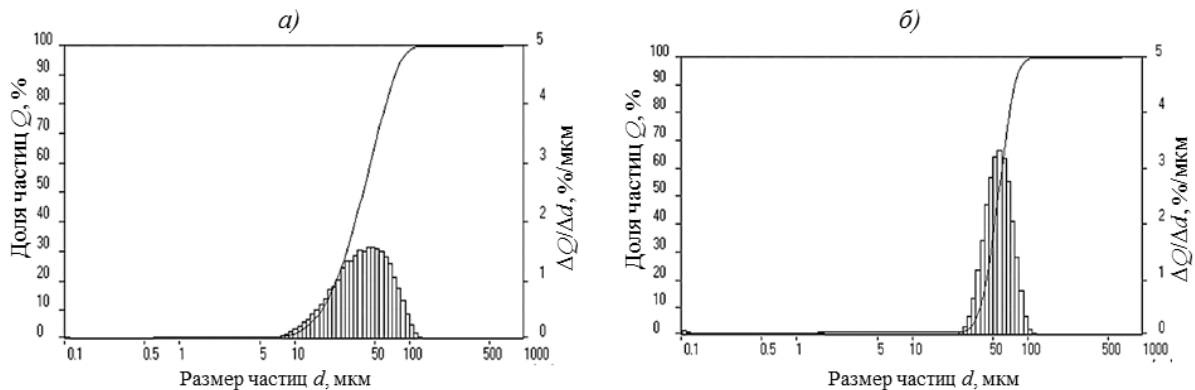


Рис. 1. Гранулометрический состав порошка газовой атомизации (а) и центробежного распыления литых заготовок (б)

Большой разброс частиц по размерам приводит к тому, что величина удельной поверхности гранул при газовой атомизации будет больше, чем у гранул при центробежном распылении. При содержании кислорода в исходном слитке ВИП на уровне 0,001%, на порошке при газовой атомизации можно обеспечить его содержание до 0,010%, а для гранул при центробежном распылении – до 0,007%, даже с учетом соблюдения условий вакуумной гигиены на всех стадиях процесса.

Наличие повышенной доли мелких фракций в гранулах при газовой атомизации объясняет факт, указанный во введении, – для данного метода распыления выход годных гранул фракций 10–40 и 10–63 больше, чем для центробежного распыления литых заготовок. Именно поэтому для селективного лазерного сплавления сплавов на основе никеля, железа, кобальта или алюминия используют в основном порошки, полученные методом распыления расплава аргоном [13, 14]. Однако при производстве заготовок дисков методом горячего изостатического прессования (ГИП) указанные особенности не столь актуальны, поэтому оба метода применяются в промышленности.

Внешний вид гранул, полученных двумя методами распыления, представлен на рис. 2. Некоторые гранулы газовой атомизации имеют на своей поверхности сателлиты (мелкие частицы, соединенные с более крупными) и так называемый «аморфный панцирь», представляющий собой корку толщиной несколько микрометров, наплавленную

на сравнительно крупную гранулу. Гранулы центробежного распыления подобных дефектов лишены.

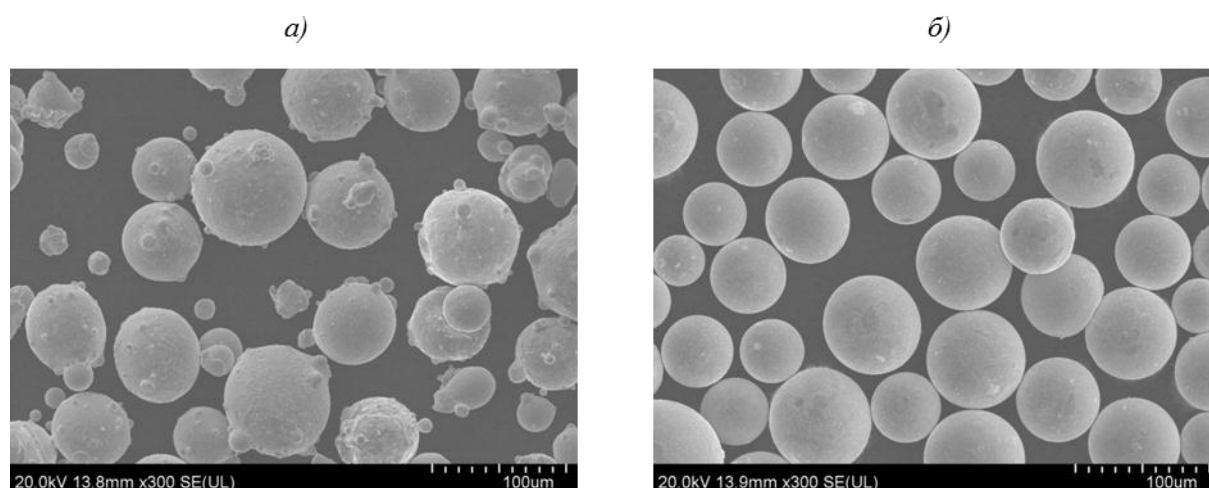


Рис. 2. Внешний вид гранул газовой атомизации (а) и центробежного распыления литых заготовок (б)

Различие в морфологии поверхности гранул (рис. 2), а также различающийся гранулометрический состав (рис. 1) приводят к разнице в некоторых технологических характеристиках порошков. Присутствие сателлитов может создавать условия, при которых гранулы газовой атомизации «цепляются» друг за друга при взаимном перемещении, а наличие частиц размером до 30 мкм свидетельствует о том, что частицы имеют более высокую плотность упаковки за счет размещения мелких частиц в пустотах, образованных при контакте более крупных частиц. Это подтверждается измерением текучести: для гранул газовой атомизации она составляет около 22 с, для гранул центробежного распыления литых заготовок – около 15 с.

Более плотная упаковка приводит к тому, что при равной насыпной плотности гранул, составляющей около 55% от плотности литого материала, плотность утряски гранул газовой атомизации составляет до 65%, что несколько больше по сравнению с аналогичным параметром для гранул центробежного распыления литых заготовок, равным 60%. Данные особенности (различия в текучести и плотности утряски) могут проявить себя при заполнении капсул для производства изделий методом ГИП. При использовании гранул газовой атомизации засыпка и уплотнение гранул в капсулах должны проводиться тщательнее и дольше по времени.

Для снижения поверхностного натяжения расплава при газовой атомизации перегрев выше температуры плавления составляет порядка 200–300°C [15]. Подобная мера для центробежного распыления литых заготовок не требуется, так как пленка расплава течет не под действием силы тяжести, как при атомайзинге, а за счет высоких значений центробежных сил. Кроме того, время существования жидкой пленки расплава в кратере распыления составляет доли секунды. Различная степень перегрева и время пребывания металла в расплавленном состоянии приводят к тому, что у гранул, полученных рассматриваемыми методами, различается размер первичных карбидов типа MeC, образующихся в процессе кристаллизации расплава.

Размер данных фаз определяется скоростью охлаждения исходных слитков под распыление. При получении гранул методом газовой атомизации данные фазы успевают существенно измельчиться относительно исходного литого материала за счет растворения в процессе выдержки расплава перед началом распыления. В итоге в гранулах размер карбидов, сформировавшихся при кристаллизации, становится меньше в несколько раз: 3–5 мкм – в литом состоянии (рис. 3, а) и до 1 мкм – в порошке (рис. 3, б).

Те же частицы в гранулах центробежного распыления литых заготовок гораздо ближе по размеру к исходному литому материалу – около 3 мкм (рис. 3, в). Вызвано это тем, что время нахождения в расплавленном состоянии в кратере распыления достаточно мало и полного растворения карбидов не происходит.

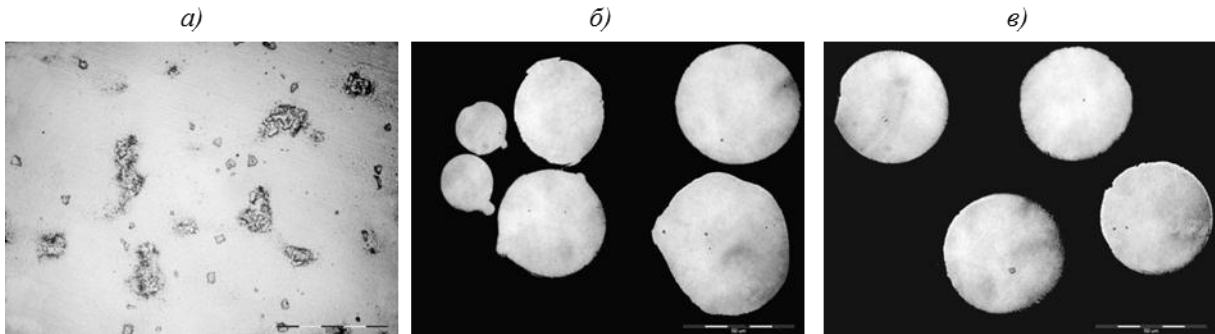


Рис. 3. Карбиды MeC в жаропрочном никелевом сплаве ($\times 1000$):
 а – слиток $\varnothing 90$ мм; б – гранулы газовой атомизации;
 в – гранулы центробежного распыления литых заготовок

Мелкие первичные карбиды в гранулах, полученных обоими методами, локализуются также и в межосных пространствах (рис. 4). Спектр МРСА от точек между дендритами (спектры 171, 172, 173, 177) обогащен Nb, Ta, Ti и Hf относительно осей дендритов (спектры 174, 175, 176), что свидетельствует о присутствии карбидов типа MeC. При прочих равных условиях для гранул газовой атомизации данная разница существеннее за счет более полного растворения карбидных фаз при нагреве под распыление.

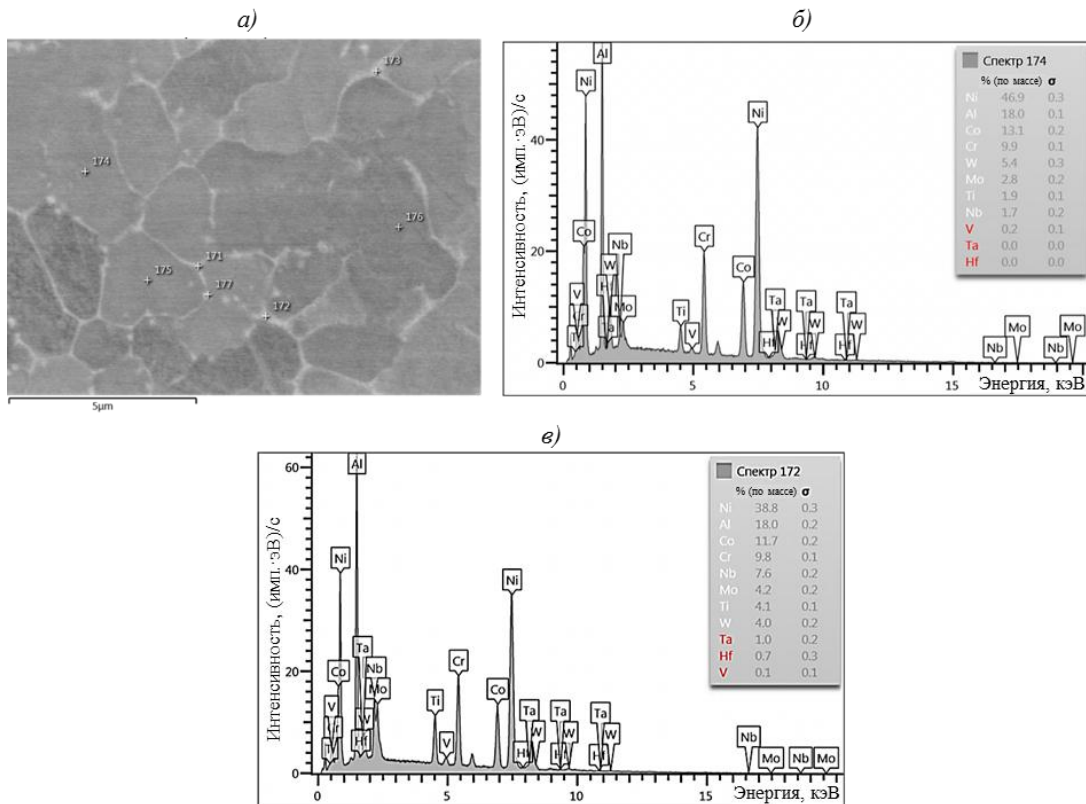


Рис. 4. Карбиды MeC в гранулах:
 а – микроструктура ($\times 10000$); качественный химический состав межосных пространств (б)
 и осей дендритов (в)

Эта особенность приводит к тому, что в материале заготовок дисков, изготовленных из гранул, полученных различными методами, карбидные фазы также различаются. Чем мельче исходные первичные карбиды, тем мельче и дисперснее будут зернограницные частицы вторичных карбидов (Me_{23}C_6 , Me_6C). В дальнейшем эти особенности могут сдерживать рост зерен при повышении температур ГИП и/или закалки, а также влиять на характеристики кратковременной и длительной прочности при высоких температурах. Данный факт необходимо учитывать при разработке режимов термообработки, соответствующих технологии производства, в том числе и способу получения исходных гранул [16].

Известной особенностью метода газовой атомизации является наличие внутригранульной аргонной пористости. Распыление расплава газом, имеющим высокое давление и скорость, приводит к тому, что в гранулах при определенных условиях капли расплава могут захватывать газовую среду. В процессе ГИП в результате воздействия высокого давления и прохождения рекристаллизации данные поры устраняются и формируется однородный компакт. При нагреве материала в однофазной области газ раскрывает области, в которых он зажат, и образуется пористость объемной долей $\sim 0,1\%$. В англоязычной литературе для этого явления используется термин *thermal induced porosity* (TIP), т. е. пористость, вызванная нагревом.

Раскрытие пор приводит к существенному снижению значений предела прочности, ударной вязкости и других механических характеристик компактированного материала. Подобный микроструктурный дефект недопустим для таких ответственных деталей, как диски турбины. Для сохранения свойств гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных из гранул газовой атомизации, закалку необходимо проводить приблизительно на $30\text{--}40^\circ\text{C}$ ниже температуры сольвус сплава, что позволяет сохранить требуемую прочность нагретого металла и не допустить раскрытия пор. Рекомендуется также использовать мелкие фракции гранул и оптимизировать процесс распыления. Поэтому зачастую заготовки дисков, произведенные из гранул газовой атомизации, подвергаются дополнительной пластической (изотермической или горячей) деформации после ГИП.

Практически полное отсутствие газовой пористости в гранулах, полученных центробежным распылением литых заготовок, напротив, позволяет проводить закалку из однофазной области. Данные особенности наряду с различием в морфологии карбидных фаз также необходимо учитывать при разработке оптимальных режимов термообработки.

Заключения

В связи с указанными различиями в технологических свойствах (гранулометрический состав, текучесть и плотность утряски), различиями в структуре (карбидные фазы и пористость) гранул газовой атомизации и центробежного распыления, а также на основании мирового опыта по данному вопросу, наиболее целесообразными при существующем уровне развития технологий являются следующие подходы.

1. Гранулы газоструйного распыления могут быть использованы для изготовления относительно простых по форме цилиндрических заготовок или прутков (в англоязычной литературе – *powder billet*). В дальнейшем данный пруток подвергается обработке по режиму, традиционному для дисков ГТД: горячей или изотермической деформации [17]. При этом формируется требуемая геометрическая форма изделий, микроструктура материала и устраняются дефекты типа пор или границ гранул, которые могут быть характерны для исходной порошковой заготовки. За рубежом для повышения

механических свойств и однородности микроструктуры используют мелкие гранулы размером <60 мкм. При этом их низкая текучесть не приводит к существенным затруднениям в процесс заполнения сравнительно простых по форме цилиндрических капсул. В отдельных случаях гранулы газовой атомизации используют для производства дисков без дополнительной пластической деформации после ГИП, однако данные технологии не применяют для ГТД пассажирских самолетов [18, 19].

2. Как подтверждает накопленный опыт отечественных исследователей, металлургов и технологов, гранулы центробежного распыления литых заготовок могут быть успешно использованы для производства заготовок дисков из жаропрочных никелевых сплавов без дополнительной пластической деформации. При этом может быть обеспечен уровень свойств, близкий или соответствующий лучшим деформируемым сплавам аналогичного назначения. Наибольший экономический и технологический эффект, а также повышение стабильности свойств, обеспечение однородности макро- и микроструктуры достигаются на крупногабаритных заготовках дисков (диаметр – более 600 мм, масса – более 200 кг) сложной формы с развитой ступичной частью.

Тем не менее обе технологии распыления имеют свои преимущества и недостатки, поэтому более тщательное их исследование, являющееся достаточно актуальной задачей, будет продолжено в дальнейшем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. В.И. Добаткин и металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2015. №2. С. 34–39.
2. Береснев 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.
3. Кошелев В.Я., Гарибов Г.С., Сухов Д.И. Основные закономерности процесса получения гранул жаропрочных никелевых сплавов методом плазменного распыления вращающейся заготовки // Технология легких сплавов. 2015. №3. С. 97–103.
4. 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.
5. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок в 2 кн. Пер. с англ. / под ред. Р.Е. Шалина. М.: Металлургия, 1995. Кн. 1. 384 с.
6. Reed R.C. The Superalloys Fundamentals and Applications. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 372 p.
7. ГОСТ Р 52802–2007. Сплавы никелевые жаропрочные гранулируемые. Марки. М.: Стандартиформ, 2006. 10 с.
8. Zhang G.Q. Research and Development of High Temperature Structural Materials for Aero-Engine Application // Acta Metallurgica sinica. August 2005. Vol. 18. No. 4. P. 443–452.
9. Востриков А.В., Сухов Д.И. Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8 (44). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3.
10. Логачева А.И. Комплексная технология изготовления тонкостенных элементов методом порошковой металлургии для производства деталей из конструкционных и функциональных сплавов на основе титана и никеля для изделий ракетно-космической техники: дис. ... докт. техн. наук. Королев, 2016. 407 с.
11. Кошелев В.Я., Ходкин В.И., Мусиенко В.Т. Исследование свойств гранул жаропрочных никелевых сплавов, полученных различными методами распыления // Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов, 1991. С. 333–340.

12. 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.
13. Евгенов А.Г., Роголев 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: 02.11.2018 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
14. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И., Семенов А.Б., Королев В.А. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016. №9 (678). С. 62–80.
15. Способ получения металлического порошка: пат. 2492028 Рос. Федерация; заявл. 02.07.12; опубл. 10.09.13, Бюл. №25.
16. Бакрадзе М.М., Волков А.М., Шестакова А.А., Летников М.Н., Бубнов М.В. Особенности изменения размера зерен в дисковом гранулируемом жаропрочном никелевом сплаве, произведенном по различным технологиям // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №2 (62). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-1-1.
17. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 129–141.
18. Rice D., Kantzos P., Hann B., Neumann J., Helmink R. P/M alloy 10 – a 700°C capable nickel-based superalloy for turbine disk applications // *Superalloys 2008*. USA: TMS, 2008. P. 139–147.
19. *Materials Needs and R&D strategy for future military aerospace propulsion systems*. Consensus Study Report. USA: Washington, 2011.