

УДК 621.762

А.В. Востриков¹, Д.И. Сухов¹**ПРОИЗВОДСТВО ГРАНУЛ МЕТОДОМ PREP
ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ –
ТЕКУЩИЙ СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3

Проанализирован вопрос применения порошков (гранул), изготавливаемых методом плазменной плавки и центробежного распыления быстровращающейся литой заготовки (метод PREP), в современных машинах для аддитивных технологий как для селективного лазерного сплавления, так и для адаптивной газопорошковой наплавки. Представлены характеристики порошков (гранул), которые являются ключевыми для их использования в машинах для аддитивных технологий. Сделаны аналитический прогноз развития метода PREP для наиболее эффективного его использования в аддитивных технологиях, а также выводы о его перспективах и возможности реализации в России.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.3. «Технологии атомизации для получения мелкодисперсных высококачественных порошков сплавов на различной основе для аддитивных технологий и порошков припоев для пайки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошки, гранулы, плазменная плавка и центробежное распыление, метод PREP.

In this article the issue of PREP powders application in modern AM units both for SLS and DMD technologies is analyzed. The essential powder properties for these powders application in AM units are shown. The analytic forecast of development of PREP method for its most effective application in AM is made. The conclusions on its prospects and implementation in Russia are made as well.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 10.3. «Technologies for receiving high-quality powders of alloys on different basis for the additive technologies and powders of solders for the soldering» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: AM, powder, granules, PREP.

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

Аддитивные технологии (далее – АТ) на данный момент развития производства металлических изделий являются наиболее активно развивающимся направлением. Они позволяют получать изделия послойно из порошков различного фракционного состава, при этом достигаются высокие показатели по выходу годного и технологичности процесса. При производстве изделий сложной конфигурации по традиционным технологиям тратится большое количество времени и коэффициент использования материала снижается и составляет менее 10%. Применение АТ решает эти проблемы, уменьшая продолжительность изготовления каждой отдельной детали и повышая КИМ вплоть до

100%. Это делает аддитивные технологии одним из самых перспективных направлений в производственных технологиях в целом [1–5].

Сырьем для аддитивных технологий служат порошки. Однако в России и за рубежом широко распространен термин «гранулы» (применительно к порошкам сугубо сферической формы). Во избежание путаницы в терминах необходимо отметить, что гранулярная металлургия представляет собой особую разновидность порошковой металлургии (ПМ). Этот термин был введен академиком А.Ф. Беловым и означал определенную специфику используемого оборудования и технологических процессов при производстве полуфабрикатов и заготовок (дисков, валов и др.) ответственного назначения [6]. Поэтому в данной статье будут использоваться оба термина.

Как известно, существует несколько разновидностей АТ. Применительно к металлическим порошкам используют два метода: Powder Bed Fusion PBF, селективное лазерное сплавление – в него входят такие методы, как DMLS, EBM, SLM и др. или Powder Bed Deposition и Direct Energy Deposition (DED, адаптивная газопорошковая наплавка) [3, 7–9]. Каждая разновидность АТ представляет собой группу технологий, объединенных на основе принципиально разных технологических подходов. Первая группа представляет собой послойное выращивание деталей на подложке (слой за слоем) с выборочным спеканием слоев порошков лазером, вторая – непосредственную подачу порошков в определенное место с практически одновременным их спеканием лазером. Вместо лазера может быть использован электронный луч, имеющий большее пятно сканирования для увеличения области единомоментного спекания [8–11].

В зависимости от вида АТ предъявляются требования к фракционному составу необходимых порошков. Для PBF-технологии основной является фракция порошков от 15 до 40 мкм, иногда до 63 мкм. Это обусловлено тем, что порошки более мелкой фракции просто выгорают под действием лазера, образуя излишнюю пористость изделия, а более крупной – не полностью спекаются из-за их размера, их использование может приводить к повышению шероховатости изделия [8].

Для DED-технологии требуются порошки другого фракционного состава – от 40 до 80 мкм. Вследствие непосредственной подачи порошков к месту их спекания использование более мелких порошков затруднительно – при попадании на поверхность они могут сразу же отрываться от нее и взлетать, что существенно снижает эффективность их использования. Порошки вышеуказанной фракции хорошо спекаются данным методом [9, 12].

Основными требованиями, предъявляемыми к порошкам, используемым в АТ, являются также их сферичность и низкое содержание газовых примесей.

В настоящее время самым распространенным методом, с помощью которого получают порошки для аддитивных технологий, является распыление расплава газом (Atomizing) [12–16]. Используют также порошки, полученные методом распыления проволоки плазмой (Plasma Atomization) [17]. Гранулы, произведенные методом плазменной плавки и центробежного распыления быстровращающейся литой заготовки (Plasma Rotating Electrode Process, PREP), применяются только в EBM, в остальных разновидностях PBF практически не представлены.

Данная работа направлена на исследование возможности использования гранул, изготовленных методом PREP, в современных машинах для АТ, а также на выявление перспектив развития данного метода изготовления гранул для них.

Схема производства гранул методом PREP представлена на рис. 1. Этот метод представляет собой распыление литой заготовки 1 диаметром d , которая вращается вокруг своей оси с определенной угловой скоростью. К ее торцу 2 подается поток тепловой энергии плазмотроном 3, установленным обычно с эксцентриситетом h , с заданной мощностью. Плазменный факел 4 расплавляет торец заготовки, на котором образуется

поверхностная пленка расплава 5. Под действием центробежных сил расплав в пленке движется от центра к периферии торца, где скапливается на кромке, образуя «венец» б. От него и отлетают капли расплава 7, которые в полете кристаллизуются в гранулы. Весь процесс проходит в среде инертных газов (аргон, гелий) [18].

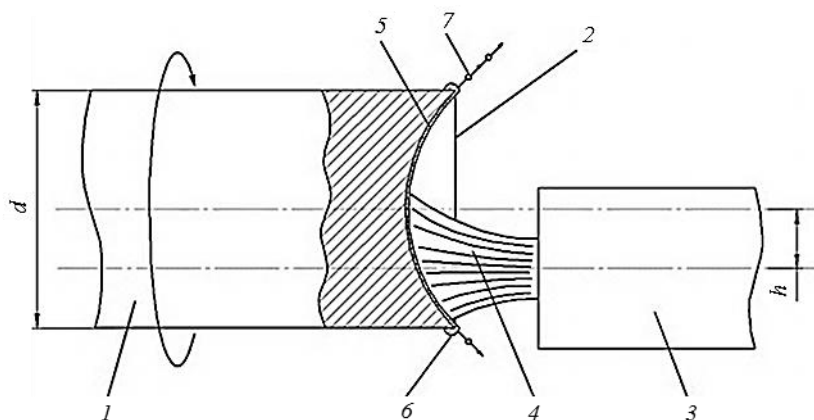


Рис. 1. Схема производства гранул методом PREP:

1 – литая заготовка (d – диаметр); 2 – торец заготовки; 3 – плазмотрон (h – эксцентриситет); 4 – поток тепловой энергии (плазма); 5 – пленка расплава; б – тороидальный «венец» из расплава металла; 7 – капли расплава

Изучены характеристики гранул, изготавливаемых методом PREP, на примере современных никелевых суперсплавов класса ВВП [19–21]. Данный метод позволяет производить гранулы в промышленном объеме на установках центробежного распыления типа УЦР (до 1400 кг за один технологический цикл) с низким содержанием кислорода – менее 70 ppm.

Размер производимых методом PREP гранул варьируется достаточно широко – от 500 мкм и менее. Минимальная рабочая (товарная) фракция гранул составляет менее 70 мкм со средним размером гранул ~50 мкм (~10% гранул менее 40 мкм). В настоящее время это наилучший результат, которого можно достичь на современных установках плазменной плавки и центробежного распыления быстровращающихся литых заготовок. Средний размер гранул рассчитывается как математическое ожидание от всех интервалов распределения гранул по фракциям, который примерно равен параметру d_{50} .

На рис. 2 представлен внешний вид гранул из жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом PREP. Гранулы обладают идеальной сферичностью и минимальной дефектностью [20, 21].

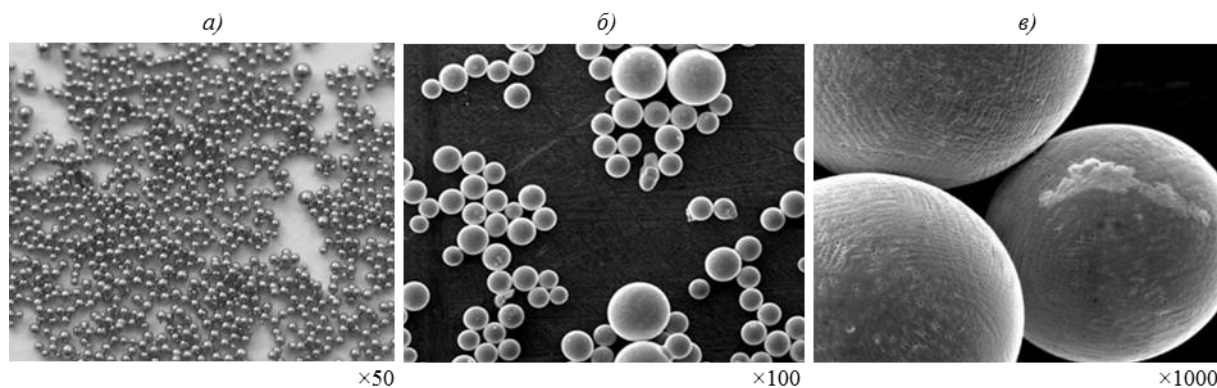


Рис. 2. Внешний вид гранул фракции менее 100 мкм из жаропрочного никелевого сплава, изготовленных методом PREP:

а – световая микроскопия; б, в – растровая электронная микроскопия

В целом гранулы, получаемые методом PREP, по всем параметрам идеально подходят для использования в аддитивных технологиях (но только для DED-технологии).

Необходимо отметить, что, несмотря на перспективность и значительные различия между методами PBF и DED, на 80% всех установленных в мире машин для АТ используется именно PBF-процесс [12, 14, 16]. Для эффективного использования в аддитивных технологиях гранул, изготавливаемых методом PREP, необходимо уменьшать их размер до менее 40 мкм. В этом и заключается перспектива развития данного метода.

Основные пути уменьшения размера гранул для метода PREP на установках распыления типа УЦР следующие:

- увеличение частоты вращения литой заготовки. Она напрямую влияет на размер производимых гранул, с ее увеличением уменьшается их средний размер;
- увеличение мощности плазматрона. Она косвенно влияет на размер гранул (немного его уменьшая), непосредственно влияет на технологичность и производительность установки (существенно их повышая);
- снижение вибрации установки при работе. Она может оказывать негативное влияние на размер получаемых гранул, дестабилизируя фракционный состав и снижая выход годного.

Материалы и методы

В качестве материала для анализа выбраны партии гранул из жаропрочного никелевого суперсплава класса ВВП.

Проведено исследование влияния совместного увеличения частоты вращения литой заготовки и мощности плазматрона на обеспечение производства гранул методом PREP размером менее 80 и 40 мкм в качестве основной перспективы развития этого метода для АТ.

Анализ проводили с помощью математической модели, описанной в работе [18]. Для этого были использованы такие параметры распыления, как мощность плазматрона, частота вращения литой заготовки, продолжительность ее полного распыления и диаметр литой заготовки. На выходе получили средний размер гранул (d_{50}), на основании которого по методике сделан прогноз гранулометрического состава.

Результаты

Проведен анализ рынка гранул, изготавливаемых методом PREP, в России. Крупнейшими производителями гранул из современных титановых и никелевых суперсплавов, использующими метод PREP, являются ОАО «ВИЛС», ОАО «Композит» и ОАО «СМК». Причем ОАО «ВИЛС» и ОАО «Композит» располагают современными установками типа УЦР (в ОАО «ВИЛС» установка УЦР-6, предназначенная для серийного производства гранул из никелевых суперсплавов фракцией менее 100 и 70 мкм [22, 23], в ОАО «Композит» – УЦР-9Т для производства титановых сплавов [24]).

На рис. 3 приведены результаты исследования фракционного состава гранул, полученных на современных установках типа УЦР. Установка УЦР-9Т создана для производства гранул из титановых сплавов, но на рис. 3 представлен аналитический прогноз производства на ней гранул из современных никелевых суперсплавов. На УЦР-6, исходя из реальных данных, получим d_{50} , равный 55,1 мкм, на УЦР-9Т – рассчитанный по математической модели d_{50} составляет 44,8 мкм.

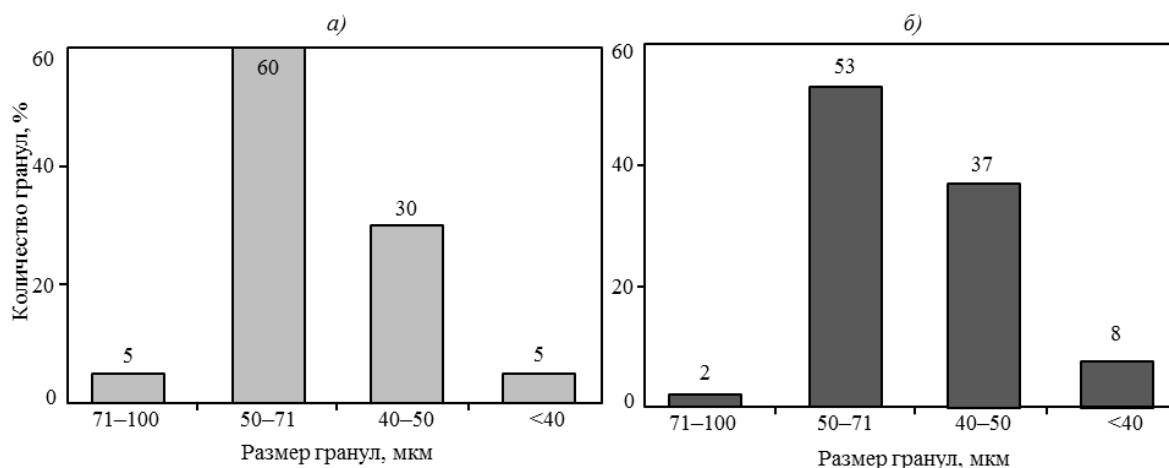


Рис. 3. Фракционный состав гранул из жаропрочных никелевых суперсплавов, изготовленных на современных установках УЦР-6 (а) и УЦР-9Т (б) методом PREP

Как было показано, количество гранул размером менее 40 мкм составляет менее 10% от общей массы гранул. При расчете для УЦР-9Т можно предположить, что количество гранул останется на том же уровне (установка УЦР-9Т по технологическим параметрам не имеет значительного преимущества перед установкой УЦР-6).

Проанализировав различные режимы изготовления, выбрали частоту вращения литой заготовки 30000 об/мин как наиболее реально достижимую и одновременно дающую хороший результат по величине d_{50} , мощность плазматрона 200 кВт.

В современных установках диаметр распыляемой литой заготовки составляет 80 мм, поэтому сначала исследовали заготовки именно такого диаметра. Проверляли также литые заготовки и большего диаметра. Экспериментальным путем было установлено, что диаметр литой заготовки не должен превышать 90 мм, чтобы размер первичных карбидных выделений, переходящих в гранулы, не превышал 8 мкм (для жаропрочных никелевых сплавов с содержанием углерода до 0,1% (по массе)). Наличие более крупных первичных карбидов в гранулах нежелательно, так как при этом в процессе карбидных реакций может возникать неоднородность распределения вторичных карбидов в конечном изделии [25]. С другой стороны, увеличение диаметра литой заготовки приводит к повышению угловой скорости при одинаковой частоте вращения, а далее – к уменьшению размера изготавливаемых гранул, поэтому предпочтительнее использовать литые заготовки с наибольшим диаметром (однако чрезмерное его увеличение эквивалентно увеличению вибрации, о негативном действии которой было сказано выше). В связи с этим для анализа использовали литые заготовки диаметром 90 мм как наиболее оптимальные.

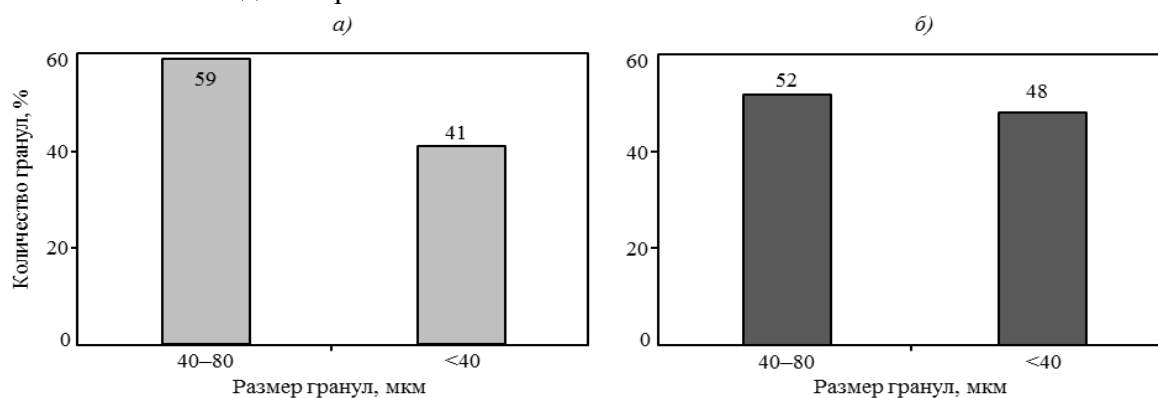


Рис. 4. Фракционный состав гранул из жаропрочных никелевых суперсплавов, изготовленных методом PREP по аналитически рассчитанному режиму, с различным диаметром литой заготовки 80 (а) и 90 мм (б)

Результаты аналитического прогноза представлены на рис. 4. Средний рассчитанный размер гранул (d_{50}) в двух случаях (для литых заготовок диаметром 80 и 90 мм) составил 38 и 33,2 мкм соответственно. Видно, что выбранная частота вращения литой заготовки (30000 об/мин) позволяет обеспечить высокий выход годных по фракции гранул (менее 40 мкм): 41% – для режима 1; 48% – для режима 2. Остальные гранулы составляют фракцию от 40 до 80 мкм. Это является искомым результатом, который показывает эффективность метода PREP, так как рассчитанный режим позволит производить до 600 кг гранул каждой фракции (менее 40 и от 40 до 80 мкм) за один цикл распыления, что, в свою очередь, позволит в будущем обеспечить отечественную АТ-промышленность гранулами жаропрочных никелевых суперсплавов.

Обсуждение и заключения

Установлено, что производство гранул методом плазменной плавки и центробежного распыления быстровращающейся литой заготовки (PREP) представляется перспективным для использования в аддитивных технологиях в связи с возможностью наращивания его мощностей при сохранении качества изготавливаемого сырья (гранул).

В связи с тем, что метод PREP практически не представлен в аддитивном производстве, необходимо расширять область его применения путем оптимизации режимов распыления в существующих в настоящее время установках типа УЦР с целью получения максимального выхода годных гранул фракцией от 40 до 80 мкм с последующей апробацией этих гранул на машинах аддитивного производства, использующих DED-технологиию.

С помощью анализа математической модели предложен режим плазменного распыления, реализация которого на новых установках типа УЦР позволит в достаточном объеме изготавливать гранулы фракцией менее 40 мкм для машин аддитивного производства, использующих PBF-технологиию.

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Что такое инновации // *Наука и жизнь*. 2011. №11. С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ в конструкциях перспективных двигателей разработки ОАО «Авиадвигатель» // *ИБ «Пермские авиационные двигатели»*. 2014. №31. С. 43–47.
4. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и технологических покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 19–36.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Современные литые никелевые жаропрочные сплавы // *Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф.* 2006. С. 39–55.
6. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). М.: Наука и технологии, 2013. 264 с.
7. ASTM F2792–12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken: ASTM International. 2012. DOI: 10.1520/F2792–12A.
8. Shahzad K., Deckers J., Kruth J.-P., Vleugels J. Additive manufacturing of alumina parts by indirect selective laser sintering and post processing // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. P 1484–1494.
9. Неруш С.В., Евгенов А.Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оцен-

- ка 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: 11.11.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
10. 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: 11.11.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.
 11. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла. М.: ФГУП «НАМИ». 2008. 57 с. URL: http://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf (дата обращения: 11.11.2015).
 12. Wohlers Report. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. 2012. 286 p.
 13. Осокин Е.Н., Артемьева О.А. Процессы порошковой металлургии [Электронный ресурс]: курс лекций. Красноярск: ИПК СФУ. 2008. URL: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/63/u_lectures.pdf (дата обращения: 11.11.2015).
 14. Capus J.M. Metal Powders. A Global Survey of Production, Applications and Markets to 2010. 4th edition. Elsevier. 2005. 314 p.
 15. Dunkley J.J. Atomization // Powder Metal Technologies and Applications. ASM International Publishers. 1998. V. 7. P. 35–52.
 16. Lawley A., Atomization // Metal Powder Industries Federation Publishers. Princeton. 2003. 166 p.
 17. Smagorinski M.E., Tsanzizos P.G. Production of spherical titanium powder by plasma atomization // Proc. World Congress of PM & Particulate Matter. Metal Powder Ind. Fed. 2002. V. 3. P. 248–260.
 18. Сухов Д.И. Применение математической модели для анализа влияния параметров плазменного распыления на крупность гранул из титанового сплава BT25УП // Технология легких сплавов. 2013. №2. С. 57–68.
 19. Гарибов Г.С., Востриков А.В., Гриц Н.М., Федоренко Е.А. Разработка новых гранулированных жаропрочных никелевых сплавов для производства дисков и валов авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2010. №2. С. 34–44.
 20. Востриков А.В., Гарибов Г.С., Бер Л.Б., Шляпин С.Д. Исследование физико-механических свойств и структуры гранул из нового высокопрочного никелевого сплава, изготовленных методом PREP // Технология легких сплавов. 2013. № 2. С. 69–75.
 21. Vostrikov A.V., Garibov G.S. Investigation in the Field of Physico-Mechanical Properties and a Structure of New Ni-Base Superalloy Powder // Proceeding HIP'14. Stockholm. 2014. P. 427–439.
 22. Способ производства гранул жаропрочных сплавов: пат. 2468891 Рос. Федерация; заявл. 18.11.11; опубл. 10.12.2012.
 23. Установка для получения металлического порошка: пат. 2356696 Рос. Федерация; заявл. 14.09.07; опубл. 27.05.2009.
 24. Логачева А.И. Технология производства гранул металлических материалов для аддитивных процессов // Инновация. Технология. Производство: сб. докл. II Междунар. технол. форум. 23–25 марта 2015 г. Рыбинск. URL: http://www.itp-forum.ru/conf2015/documents/Section_presentations/1_Логачева_Композит.pdf (дата обращения: 15.10.2015).
 25. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. В.И. Добаткин и металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2015. №2. С. 34–40.