

УДК 621.763

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ГРАНУЛ  
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ФОРМИРОВАНИЕМ  
ЗАДАННОГО СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ  
МАТЕРИАЛА**

Ушакова М.Н., студентка гр. Т11О-303Б-20, III курс  
Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет),  
г. Москва

**Введение.** В последнее время металлургия гранул высокопрочных никелевых сплавов довольно интенсивно развивается практически во всех индустриально развитых странах. И первую очередь, в тех странах, которые индустриально производят изделия авиационной техники, современные двигатели, электроустановки, изделия для атомной промышленности, т.е. имеющие отрасли производства, связанные с широким использованием никелевых сплавов. Это обусловлено тем, что металлургия гранул имеет одно очень важное преимущество по сравнению с другими технологиями производства: обеспечивает минимальное количество отхода основного материала. С учетом того что стоимость никелевых сплавов в последние годы значительно выросла, то затраты на покупку основного материала в себестоимости материаловемых изделий из никелевых сплавов (например дисков современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), газотурбинных электроустановок и т.д.) доходит до 90%, то вышерассмотренное преимущество использования металлургии гранул при производстве изделий из никелевых сплавов является определяющим при выборе технологии производства [1, 2]. Важно отметить тот факт, что проблема обеспечения заданного структурно-фазового состояния гранул никелевых сплавов давно стоит перед металлургами.

**Исследование состояния вопроса.** При производстве гранул для изготовления жаропрочных никелевых сплавов на территории РФ и за рубежом используются следующие методы: газовая атомизация струи расплавленного металла струей инертного газа, метод дугового центробежного распыления врачающегося электрода (rotate electrode process – REP), метод плазменной плавки и центробежного распыления быстро врачающейся заготовки (plasma rotate electrode process – PREP), распыление струи расплава с помощью подложки (диска, тигля и т.д.). Однако последний метод в производственной практике используется гораздо реже, чем остальные [3]. Причем технология гранулированных материалов для производства дисков ГТД у нас в стране и за рубежом развивается в двух абсолютно различных направлениях. В РФ гранулы для производства заготовок дисков получают способом PREP, а за рубежом применяют метод диспергирования расплава атомизацией (atomizing processes) [4].

Методы центрифугования жидкого расплава из быстро вращающихся перфорированных тиглей, хорошо зарекомендовавшие себя при промышленном производстве гранул алюминиевых сплавов, для производства жаропрочных никелевых сплавов в отечественной и зарубежной промышленности не используются [5, 6]. На рис. 1 представлена разработанная автором классификация промышленных методов получения гранул жаропрочных никелевых сплавов.

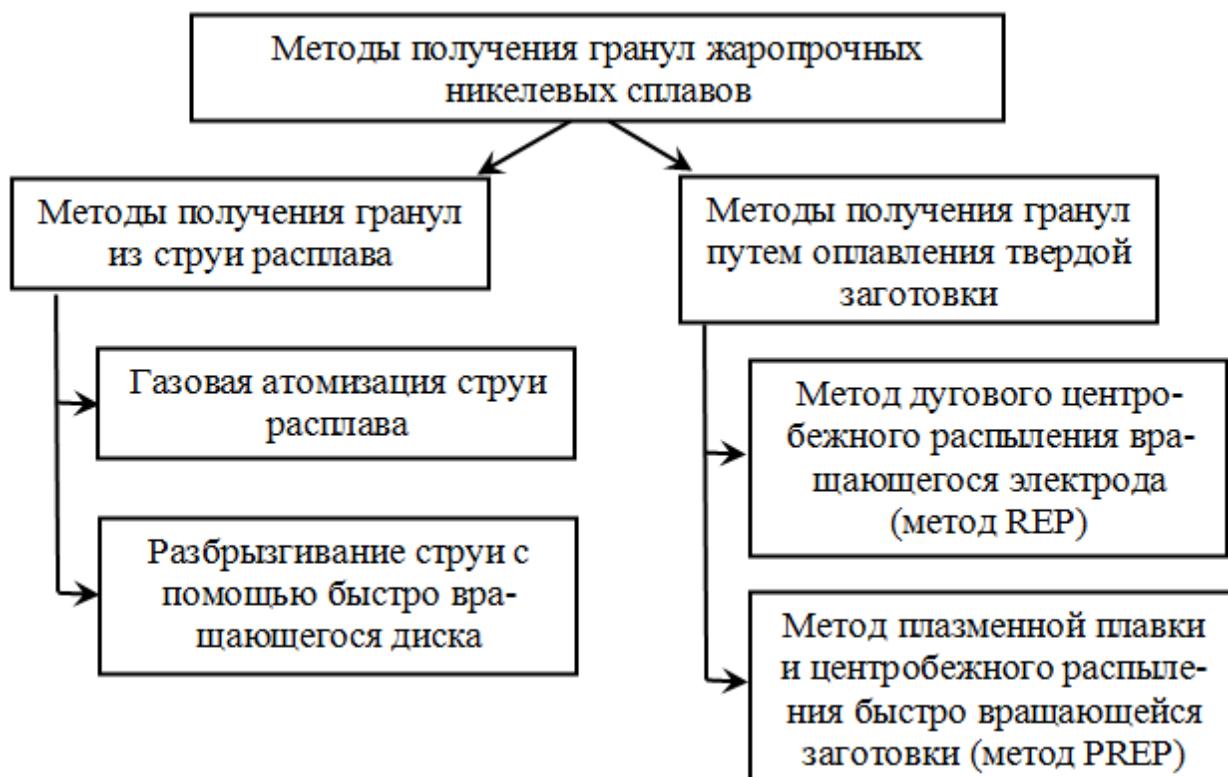


Рисунок 1 – Классификация методов получения гранул жаропрочных никелевых сплавов

Известно, что при производстве гранул структурно-фазовый состав сложного никелевого сплава определяется не только составом шихты или структурно-фазовым состоянием материала оплавляемого слитка (полуфабриката), но и также определяется скоростью охлаждения капли расплава, ее размерами, условиями теплоотвода, химическим составом газовой среды, особенностями кристаллизации [7]. Жаропрочные никелевые сплавы состоят из твердого раствора на основе никеля с гранецентрированной кубической решеткой ( $\gamma$ -фаза), интерметаллидной упрочняющей фазы на основе легированного соединения  $Ni_3Al$ , карбидов и боридов. В малых долях могут содержаться оксиды, неметаллические включения [8].

**Методика проведения исследований.** Были проведены исследования по получению методами газовой атомизации и PREP гранул жаропрочных никелевых сплавов марок ЭП741НП, ЭИ698П, ЭП975П. Получение гранул методом PREP проводилась на установках типа УЦР по различным

скоростным режимам при частотах вращения заготовки от 10 000 до 20 000 об/мин.

Была проведена оценка структурно-фазовых состояний материала гранул. Технологические параметры получения гранул были стандартными, однако в процессе исследований велась оценка качества получаемого гранулята, оценка наличия дефектов формы получаемых гранул, оценка количественного состава размеров гранул. Далее полученные по рассмотренным технологиям сферические гранулы подвергали рассеву на заданный гранулометрический состав. Предусматривалась термическая дегазация гранул, осуществляемая посредством нагрева в высоком вакууме перед засыпкой в капсулы. Гранулы засыпали в стальные капсулы (материал капсул сталь 3 (Ст. 3)) под высоким вакуумом с одновременной дегазацией. Далее капсулы герметизировали. Герметизация капсул осуществлялась путем электроннолучевой сварки накладки на приемное отверстие. Консолидация гранул до теоретической (или 100 %-й) плотности материала происходила методом горячего изостатического прессования (ГИП) в газостате в среде аргона при 1100–1200 °C в условиях всестороннего сжатия газа высоким давлением (порядка 200 МПа). Полученные горячим изостатическим прессованием полуфабрикаты контролировались с точки зрения плотности полученной структуры материала. Далее проводилась оценка структурно-фазовых состояний материала полученных компактных изделий стандартными методами исследований.

**Результаты проведения исследований.** Было установлено, что при получении гранул методами газовой атомизации в большой степени проявляется аргонная пористость гранул. При распылении потока расплавленного металла газовой струей изначально получается не капля металла, а некая пространственная пленка сложной конфигурации. Далее, в процессе движения данной частицы происходит ее схлопывание за счет сил поверхностного натяжения. При этом часть аргонной среды оказывается внутри сформировавшейся гранулы. Разная интенсивность отвода тепла и, следовательно, разная скорость кристаллизации, приводит к различному фазовому состоянию по телу частицы. Этот факт подтверждается и результатами других исследований [9]. В дальнейшем при горячем изостатическом прессовании (ГИП) происходит раскрытие пор и формирование однородной структуры компактируемого материала. Однако раскрытие пор приводит к интенсивному снижению показателей предела прочности, значений ударной вязкости и других механических характеристик компактируемого материала, что недопустимо при изготовлении деталей ответственного назначения. Установлено, что при отрыве от основной массы расплава происходит возникновения жидкого мостика, который вместе с каплей отрывается от расплава, а далее он застывает на поверхности частицы в виде сателлита (рис.1). За счет разных скоростей охлаждения основной гранулы и сателлита их структура соответственно разная – сателлиты характеризуются меньшими размерами дендритов [10, 11].

Кроме того, установлено, что при формировании гранул методами газовой атомизации разброс гранулометрического состава больше, чем в случае получения гранул методами PREP. Наличие сателлитов и наличие разнородного гранулометрического состава приводит к снижению сыпучести гранул. Поэтому операции заполнения и утряски формы перед реализацией процессов ГИП необходимо проводить более тщательно и это требует более существенных временных затрат. В результате проведенных исследований установлено, что при реализации методов PREP необходимо стремиться к получению сферических порошков с размером частиц  $<100$  мкм. При таком размере частиц удается получить более высокие скорости кристаллизации даже в аргонной среде. Скорости кристаллизации расплава в этом случае достигают уровня  $10^4$ – $10^5$  °С/с. Скорость увеличения кристаллизации путем уменьшения размеров частиц осуществляется путем увеличения скорости вращения электрода.

В итоге это увеличение скоростей охлаждения позволяет увеличить степень легирования сплавов, значительно снизить размер дендритных ячеек или перейти к мелкой ячеистой структуре, что способствует повышению однородности химического и фазового состава материала, увеличению механических характеристик и т. д. Однако, стабильность свойств полученных газостатическим прессованием полуфабрикатов в большой степени зависит от температурно-скоростных параметров обработке. Поэтому для реализации данных процессов целесообразно применять методы управлении температурно-скоростными режимами деформирования [12].

**Заключение.** Никелевые сплавы типа ЭП741НП, ЭИ698П, ЭП975П, полученные технологией гранульной металлургии, широко используется для получения дисков газотурбинных двигателей, для производства других изделий высокотемпературного тракта, при изготовлении деталей двигателей в авиа- и ракетостроении. При проведении исследований установлена перспективность применения метода PREP для производства гранул жаропрочных никелевых сплавов по сравнению с методами газовой атомизации. Доработаны элементы установки по получению гранул в инертной среде методом PREP с минимальным содержанием кислорода в получаемом материале  $\sim 0,003$  % масс., что является одним из негативных факторов, влияющих на качество получаемого сырья. Таким образом, на основании теоретических и экспериментальных исследований можно оценить перспективность разрабатываемой технологии. Сделаны выводы о применимости предлагаемого метода для промышленного производства гранул из никелевых сплавов, в том числе из сплавов ЭП741НП, ЭИ698П, ЭП975П.

### **Список литературы:**

1. Анисович А. Г., Андрушевич А. А. Структуры металлов и сплавов в технологических процессах машиностроения. Минск: Беларуская навука, 2018. – 134 с.

2. Reed R.C., et al. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2006. 372 p.
3. Жаров М.В. Процессы получения гранулированных материалов из алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu по технологии сверхбыстрой кристаллизации гранул // Металлург. 2022. № 3. с. 39-49. doi: 10.52351/00260827\_2022\_03\_39.
4. Капуткин Е. Я., Бер Л. Б., Казберович А. М., Мухина Т. А. Морфология и размеры гранул жаропрочных никелевых сплавов, получаемых распылением расплава и методом PREP // Технология легких сплавов. 2021. № 4. С. 79–93. doi: 10.24412/0321-4664-2021-4-79-93.
5. Жаров М.В. Исследование свойств гранулированных материалов системы Al-Cu-Mg, прессуемых из гранул, полученных с применением технологии центрифугования при сверхвысоких скоростях охлаждения // Технология машиностроения, 2021, № 4 (№ 226), с. 5-9. doi: 10.34641/TM.2021.226.4.011.
6. Cui C.Y., Sato A., Gu Y.F., Ping D.H., Harada H. Phase stability and yield stress of Ni-base superalloys containing high Co and Ti // Metallurgical and Materials Transactions. 2006. November. A 37 (11). P. 3183–3190.
7. Жаров М.В. Разработка технологии производства гранулированных материалов с ультрадисперсной структурой из высокопрочных алюминиевых сплавов // Вестник машиностроения, 2022, № 8, с. 49-55. doi: 10.36652/0042-4633-2022-8-49-55.
8. Xia Y., Khezzar L., Alshehhi M., Hardalupas Y.. Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer // International Journal of Multiphase Flow. 2017. Vol. 94. pp. 31-43.
9. Жаров М.В. Анализ технологических процессов производства сферических порошков и гранул моноалюминида никеля NiAl для нужд отечественного двигателестроения // Вопросы материаловедения. 2022. № 3 (111). с. 29-40. doi: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-29-40.
10. Жаров М.В. Сравнительный анализ особенностей технологий получения качественного сферического порошка алюминида никеля NiAl // Металлург. 2022. № 11. с. 57–65. doi: 10.52351/00260827\_2022\_11\_57.
11. Старовойтенко Е.И., Зенина М.В., Казберович А.М. Физические аспекты получения металлических порошков для гранульных и аддитивных технологий // Технология легких сплавов. 2020. № 3. С. 4–10.
12. Жаров М.В. Измерительно-управляющая система термокомпрессионного оборудования с регламентированными температурно-скоростными параметрами деформирования // Измерительная техника. 2022. № 12. с. 46–51. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-46-51>.