

УДК 669.731.7

## **АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТЕЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНУЛ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Бобылева К.А., студентка гр. М6О-305БВ-22, III курс  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет)"  
г. Москва

**Введение.** Развитие авиастроения требует значительного увеличения прочностных, виброустойчивых и других эксплуатационных свойств материалов, применяемых при изготовлении деталей современных летательных аппаратов. Многие детали современных самолетов, беспилотных систем, летательных аппаратов баллистического типа и, даже, космических аппаратов изготавливают из высокопрочных алюминиевых сплавов. Однако, ресурс повышения прочностных характеристик этих сплавов традиционными в металлургии методами легирования практически исчерпан. Поэтому, в настоящее время, активно развиваются технологии повышения прочностных характеристик промышленно применяемых алюминиевых сплавов методами гранулирования. Создание высокой скорости кристаллизации маленьких по размерам и объему частиц (гранул, порошинок и т.д.) обеспечивает возможность получения ультра мелкодисперсной структуры материала, обеспечивает возможность получения пересыщенного легирующими элементами твердого раствора и, как следствие, обеспечивает более высокие прочностные характеристики получаемого гранулированного материала. Существует фундаментальная зависимость дендритного параметра структуры и прочностных свойств гранулированных алюминиевых материалов от скорости кристаллизации. Суть данной зависимости состоит в следующем: чем выше скорость кристаллизации, тем выше дисперсность структуры и меньше, в логарифмической последовательности, дендритный параметр (т.е. межкосное расстояние между кристаллами дендрита второго порядка) [1, 2]. Тогда понятно, что для получения более высоких прочностных характеристик гранулированных материалов необходимо обеспечить более высокие скорости кристаллизации. Вопрос состоит только в том, как реализовать эти технологии повышения скоростей кристаллизации с созданием экономически эффективных производственных процессов с большой производительностью и высоким качеством получаемых гранул или частиц порошка (так называемых порошинок).

**Изучение состояния вопроса.** При проведении исследований были проанализированы все основные способы получения гранул металлических материалов, при этом основное внимание уделялось методам получения гранул алюминиевых сплавов, в том числе и высокопрочных. На основе анализа

технической литературы [2, 3] определены основные методы получения гранул. Причем установлено, что в зарубежной практике основными методами получения гранул высокопрочных алюминиевых сплавов являются методы распыления струи расплава или метод распыления оплавляемого вращающегося электрода [3, 4]; в российской производственной практике наиболее распространены вибрационный метод или методы разбрзгивания расплава [5, 6]. На рис. 1 представлена разработанная классификация методов гранулирования металлических материалов, в том числе методов получения гранул высокопрочных алюминиевых сплавов, которые применяются в промышленности в Российской Федерации и в зарубежных странах.

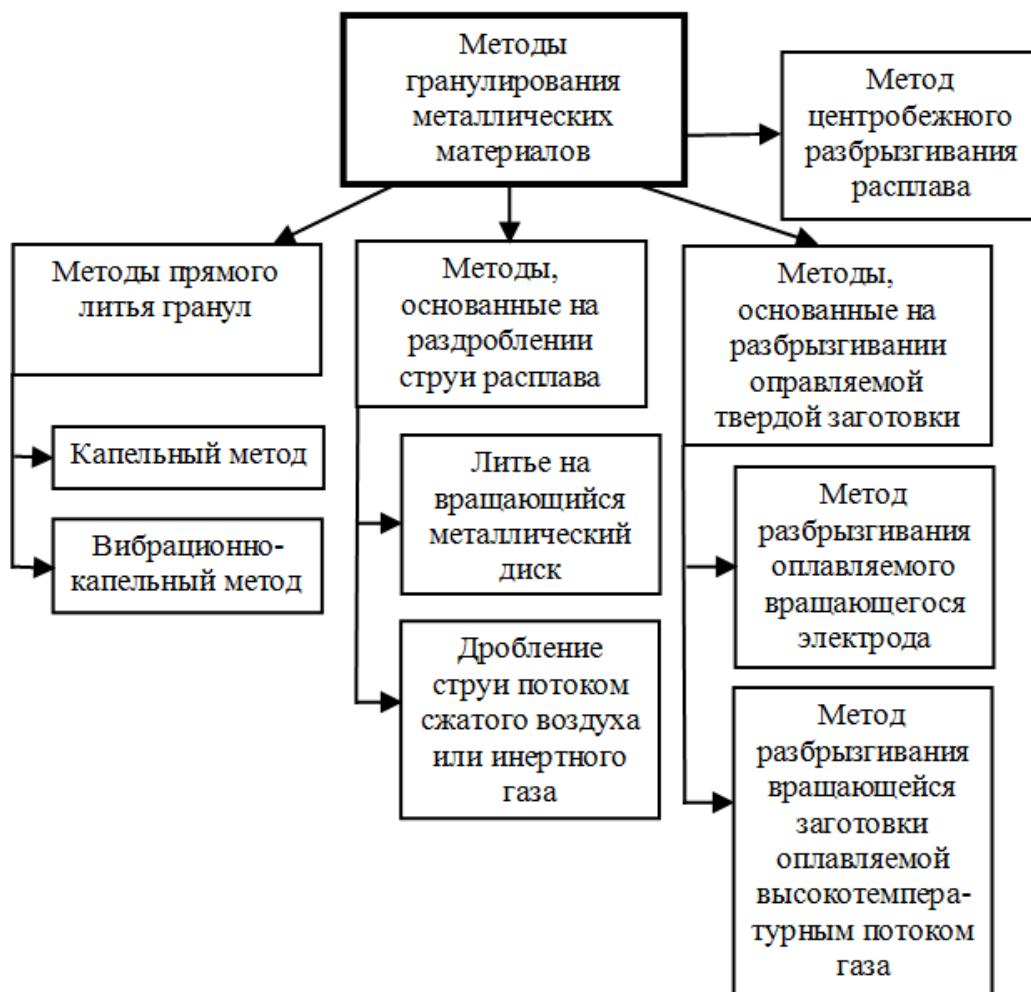


Рисунок 1 – Классификация основных методов гранулирования металлических материалов

Каждый конкретный способ получения гранул (см. рис. 1) характеризуется теми или иными технологическими параметрами или особенностями технологического процесса, которые позволяют увеличивать скорость кристаллизации капель расплава в той или иной степени. На основе анализа моделей теплообмена в процессе кристаллизации установлен ряд параметров, влияющих на увеличение скорости кристаллизации с наибольшей интенсив-

ностью [7, 8]. Например, наиболее интенсивно на изменение скорости кристаллизации влияет изменении объема (и, следовательно, диаметра) получаемых гранул [9] или значительное увеличение скорости движения кристаллизуемой капли, обеспечивающей сбив паровой оболочки, возникающей вокруг кристаллизуемой капли [10]. Остальные методы повышения скоростей кристаллизации оказываются менее действенными [5, 6].

На рис. 2 представлена разработанная классификация различных способов увеличения скоростей кристаллизации капель расплава металлических материалов. Каждый из этих способов имеет право на использование, но для эффективного, наиболее действенного применения выбираем только способы управления размером капли расплава и управления скоростями ее движения.



Рисунок 2 – Классификация возможных способов увеличения скоростей кристаллизации капель расплава

Очевидно, что достижение минимальных размеров гранул возможно за счет применения методов газовой атомизации или значительного увеличения скорости вращения оплавляемого электрода. Однако, метод газовой атомизации, т.е. способ получения гранул, в котором поток нагретого воздуха или нагретого инертного газа разбивает струю расплава не позволяет управлять размерами получаемых гранул [11]. Тем не менее, гранулы, получаемые дан-

ным методом имеют меньшие размеры (средний диаметр гранул составляет порядка 0,5-1,0 мм и относит данную продукцию скорее к области порошков, а не гранул) [12]. Отсеивание крупных гранул, при формировании которых преобладали меньшие скорости кристаллизации и, следовательно, созданная в них структура материала не достаточно мелкозернистая, может быть осуществлено на этапе назначаемой операции сепарации. Однако данная технология имеет один существенный недостаток: форма гранул, в основном преобладает не правильная, угловатая и не сферическая, гранулы характеризуются низкой сыпучестью и низкой насыпной плотностью. Метод оплавляемого вращающегося электрода (или его модификации в виде вращающейся заготовки, оплавляемой высокотемпературным потоком инертного газа) характеризуется теми же самыми недостатками [13]. Кроме того, при реализации данных методов образуется большое количество дефектных гранул, что также, в итоге, оказывается на качестве получаемого компактного гранулированного материала [10, 12].

**Методика проведения исследований.** Гранулы высокопрочных алюминиевых сплавов В95, В96Ц получали методом газовой атомизации и методом центрифугования расплава по методике, изложенной в [5]. Расстояние от области распыления струи металла до охлаждающей жидкости (технической воды) в случае газовой атомизации составляло 250-300 мм, в случае центрифугования расплава расстояние от перфорированного тигля до охлаждающей среды составляло 10-30 мм. Диаметр отверстий в перфорированном вращающемся тигле составлял 0,5-1,0 мм. Химический состав марок промышленных алюминиевых сплавов соответствовал требованиям ГОСТ 4784-2019 "Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки" и ОСТ 1.90048-90 "Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки". Оценка величин скоростей кристаллизации капель расплава проводилась классическими методами оценки дендритного параметра структуры зерна, имеющими высокий уровень доказанности в металлургии гранул [9, 10]. Полученные гранулы подвергали тщательной сепарации путем просеивания через сито с заданными размерами ячеек. При этом в качестве анализируемых образцов, выделялись три группы:

- гранулы, полученные методом газовой атомизации диаметром ~0,3 мм;
- гранулы, полученные методом газовой атомизации диаметром ~1,0 мм;
- гранулы, полученные методом центрифугования диаметром ~1,0 мм.

Гранулы брикетировались в брикеты при температуре ~250-300 °C. Выбор указанного температурного диапазона выбирался с целью избежать возможной рекристаллизации структуры гранул и выпадения вторичных фаз в результате распада пересыщенного твердого раствора. Из полученных брикетов вырезались темплеты, из которых изготавливали шлифы. Изучалась микроструктура материала с помощью методы оптической микроскопии на микроскопе *Olymprus GX-51*.

**Обсуждение полученных результатов.** В результате проведения исследований при газовой атомизации струи расплава алюминиевых сплавов В95, В96Ц были получены гранулы диаметром 0,1 до 2,0 мм. Гранулометрический

анализ позволил выявить крайне разнородный размерный состав гранул. При этом выход годного гранул диаметром  $0,3\pm0,05$  мм составил  $\sim 5\%$  от общей массы полученных гранул, выход годного гранул диаметром  $1,0\pm0,05$  мм составил  $\sim 8\%$  от общей массы. Наблюдалось большое количество гранул с дефектами различных форм и размеров. По аналогии с данными, полученными при проведении других исследований [6, 12] имелись гранулы с порами и раковинами, сдвоенные гранулы, гранулы с внедренными сателлитами, конгломераты из двух и более гранул и т.д. Анализ структуры позволил определить, что дендритный параметр для гранул диаметром 1,0 мм составлял порядка 10 мкм, для гранул диаметром 0,3 мм – порядка 0,5 мкм. Тогда скорости охлаждения капель расплава для гранул диаметром 0,3 и 1,0 мм, определенные на основании известной фундаментальной зависимости [1, 2, 9] составляли соответственно  $\sim 1,0 \times 10^3$  и  $\sim 5,0 \times 10^3$  °С. Вероятно, большой вклад в снижение скоростей кристаллизации вносит расстояние от точки распыления струи расплава металла до водной поверхности (порядка 250 мм). Однако значительно уменьшить это расстояние конструктивно довольно сложно. В этом случае струи сжатого воздуха (или отраженные вихри воздуха от струи расплава) начинают взаимодействовать с водной поверхностью охлаждающей среды. Тем не менее данный метод получения гранул крайне прост, эффективен и экономически выгоден, так как обеспечивает минимальные затраты на технологическое оборудование и отличается минимальной себестоимостью получаемого гранулята. В результате проведенных исследований по получению гранул алюминиевых сплавов марок В95 и В96Ц установлено, что для получения гранул алюминиевых сплавов целесообразно использовать скорости вращения перфорированного тигля выше 4500-5000 об./мин., которые из-за высокой поступательной скорости капли расплава обеспечивают сбив паровой оболочки, возникающей вокруг кристаллизуемой капли диаметром 1,0-3,0 мм. В результате это обеспечивает получение микроструктуры гранул по величине дисперсности аналогичную возникающей при кристаллизации в водной среде порошинок размером 5,0-10,0 мкм. На рис. 3 представлена экспериментально полученная зависимость дендритного параметра микроструктуры гранул сплавов В95 и В96Ц диаметром 1,0 мм (в мкм) в зависимости от создаваемых скоростей вращения перфорированного тигля с расплавом. Резкий перепад на приведенном графике (рис. 3) объясняется эффектом создания такой поступательной скорости движения капли расплава, которая обеспечивает сбив паровой оболочки, возникающей вокруг кристаллизуемой капли и обеспечивает постоянный контакт кристаллизуемой капли расплава с водной охлаждающей средой [5, 10].

Проведенный анализ микроструктуры гранул показал, что в данной области скоростей вращения тигля, который составляет  $\sim 4000$ -5500 об./мин. наблюдается резкий рост скоростей кристаллизации, который обеспечивает уменьшение средней величины дендритного параметра материала гранул практически в 4 раза: с  $\sim 10,0$  мкм до  $\sim 1,8$  мкм. При дальнейшем увеличении скоростей вращений тигля таких резких изменений в увеличении скоростей

кристаллизации не наблюдается. Естественно, что объяснить такой резкий сдвиг можно только резким изменением скорости теплоотвода. Причем, известно, что теплопроводность воды в разы больше теплопроводности паровой смеси, в том числе и теплопроводности насыщенного пара. В соответствии с известной зависимостью размера дендритного параметра от скоростей кристаллизации для обеспечения величины межосного расстояния дендритов второго порядка размером 1,5-2,0 мкм для алюминиевых сплавов необходимы скорости кристаллизации материала гранул  $\sim 5 \times 10^4$  °/С.

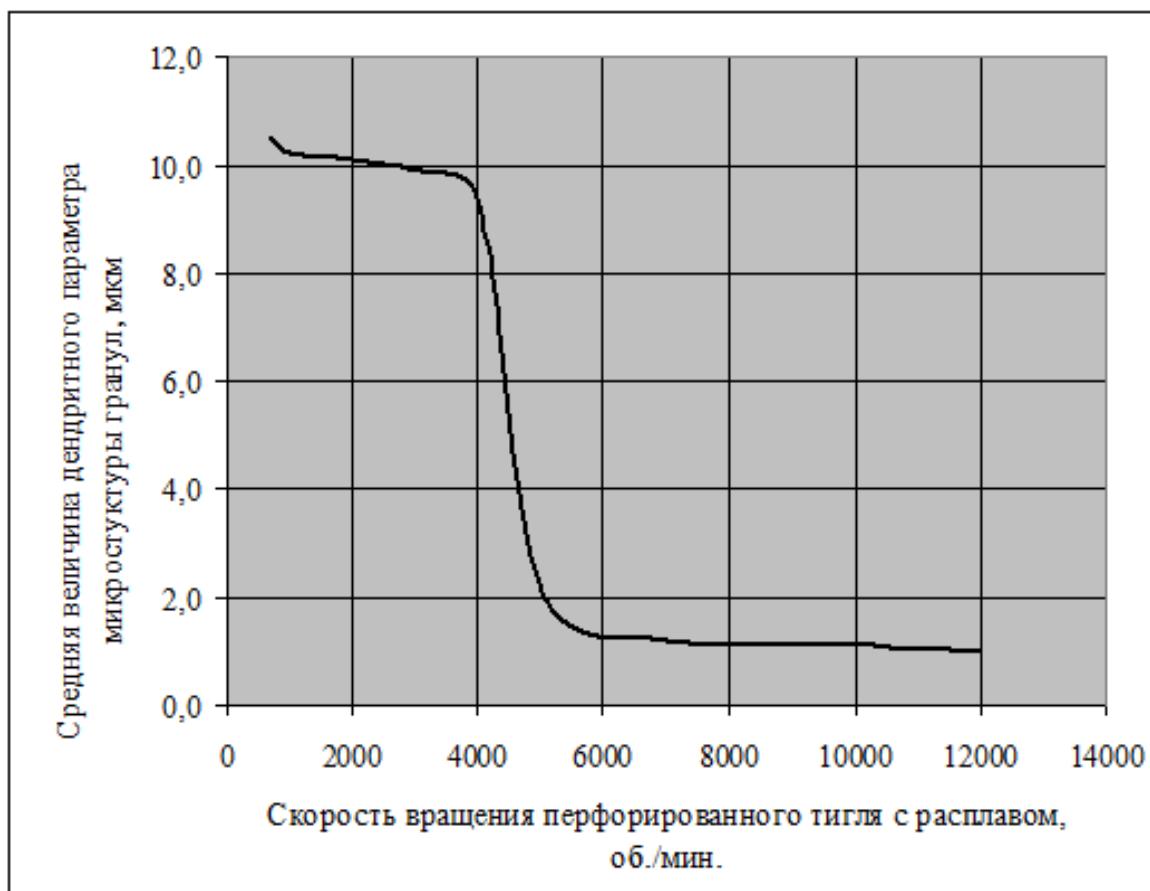


Рисунок 3 – Зависимость дендритного параметра микроструктуры гранул сплавов В95 и В96Ц диаметром  $\sim 1,0$  мм в зависимости от скоростей вращения перфорированного тигля с расплавом

При этом диаметр получаемых гранул составляет  $\sim 1,0$  мм. Получение такого дендритного параметра материала гранул методом газовой атомизации возможно только в случае получения гранул диаметром  $\sim 50$ -100 мкм, которые по своим размерным характеристикам согласно ГОСТ 17359–82 "Порошковая металлургия. Термины и определения" уже относят к категории "частиц порошка" (порошинок). Выход годного в рамках исследуемого процесса центрифugирования расплава сплавов В95 и В96Ц (а именно получение качественных гранул диаметром  $1,0 \pm 0,05$  мм) достаточно высок и составляет  $\sim 70$ -80 % от общей массы гранулята. При проведении экспериментальных иссле-

дований установлено, что получение гранул центрифугированием расплава по методике, изложенной в [6, 9] диаметром менее ~ 0,5 мм крайне затруднительно. При этом диаметре отверстия в тигле "забиваются" расплавом и производительность процесса резко падает. Гранулят получается разных размеров, в том числе диаметром более 1,0 мм. Несмотря на тот факт, что теоретические расчеты показывают, что центробежная сила, действующая на фрагмент расплава в области отверстия перфорированного тигля гораздо больше поверхностных сил натяжения расплавленного металла и, казалось бы, ничего не препятствует отделению капли от основной массы расплава, эксперименты показывают определенные проблемы. Достоверного объяснения данного явления пока нет. Для изучения данных проблем требуется проведение дополнительных исследований.

Кроме этого, при поведении исследований, было выполнено имитационное моделирование работы участка цеха для получения гранул металлических материалов. В качестве прикладной программы для ситуационного анализа применялась среда имитационного моделирования AnyLogic отечественного разработчика, которая зарекомендовала свою высокую достоверность и адекватность при проведении исследований подобного рода [14]. При проведении имитационного моделирования последовательности металлургических процессов определена производительность операций на смежных технологических операциях, определены максимальные объемы межоперационных запасов и выявлена динамика их формирования. В рамках проведенной работы были предложены мероприятия по оптимизации технологии и расстановке производственного оборудования.

**Заключение.** Таким образом, на основании проведенного комплексного анализа полученных экспериментальных данных установлены технологические параметры процессов гранулирования высокопрочных алюминиевых сплавов марок В95 и В96Ц методами газовой атомизации и методом центрифугирования расплава, которые обеспечивают максимальный выход годного при производстве гранулята диаметром ~ 1,0 мм. Выявлены преимущества и недостатки каждого из рассмотренных методов производства. Установлено, что оптимальной скоростью вращения перфорированного тигля с расплавом для производства гранул диаметром ~ 1,0 мм методом центрифугирования является диапазон скоростей вращений ~ 4000-5500 об./мин.

#### **Список литературы:**

1. Телешов В.В. Фундаментальная закономерность изменения структуры при кристаллизации алюминиевых сплавов с разной скоростью охлаждения // Технология легких сплавов.– 2015. – № 2. – с.13-18.
2. Добаткин В.И., Елагин В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. М.: "Металлургия", 1981. – 176 с.
3. 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.

4. Angelo P. C., Subramanian R. Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd. – 2008. – 312 p.
5. Жаров М. В. Исследование закономерностей процесса охлаждения и кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов в водной среде // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т. 64. № 6 (382). – с. 4-16. doi: 10.15372/PMTF202315248.
6. 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.
7. Zeoli N., Sai G., Kamnis S. Numerical modelling of metal droplet cooling and solidification // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. – №. 51 (15-16). – pp: 4121-4131. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.044
8. Bergmann D., Fritsching U., Bauckhage K. A mathematical model for cooling and rapid solidification of molten metal droplets // International Journal of Thermal Sciences. – 2000. – №. 39 (1). – pp. 53-62. doi:10.1016/S1290-0729(00)00195-1.
9. Жаров М. В. Анализ особенностей процессов теплообмена при кристаллизации гранул алюминиевых сплавов в водной и водно-паровой среде // Материаловедение. – 2023. – № 8. – с. 3-13. doi: 10.31044/1684-579X-2023-0-8-3-13.
10. Жаров М.В. Построение математической модели процесса охлаждения и кристаллизации металлических капель при гранулировании центрифугированием расплава // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 2 (114). – с. 98-112. doi: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-98-112.
11. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. Numerical model of electrode induction melting for gas atomization // The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2011 – Vol. 30(5). – pp. 1455–1467.
12. Жаров М. В. Анализ особенностей образования дефектов формы и структуры сферических порошков мономинида никеля NiAl при реализации технологий их промышленного производства // Технология металлов. – 2024. – № 5. – с. 21-32. doi: 10.31044/1684-2499-2024-0-5-21-32.
13. Капланский Ю. Ю. Получение узкофракционных сферических порошков жаропрочных сплавов на основе алюминида никеля и их применение в технологии селективного лазерного сплавления. Дис. на соискание степени канд. техн. наук. М.: МИСиС. – 2020. – 252 с.
14. Жаров М.В. Исследование перспектив применения программных сред имитационного моделирования при разработке и оптимизации производств машиностроения // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2021. – № (54). – с. 58-67.doi: 10.17072/1993-0550-2021-3-58-67.