

УДК 621.763

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНУЛ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Скобелева А.В., студентка гр. М6О-105БВ-23, I курс  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет)",  
г. Москва

**Введение.** При исследовании процессов кристаллизации гранул алюминиевых сплавов крайне важно знать скорость охлаждения капли расплава, скорость кристаллизации и основные закономерности затвердевания металла. Именно от скорости кристаллизации капли зависят особенности формирования твердого пересыщенного раствора, особенности формирования упрочняющих фаз и дисперсность микроструктуры материала. Чем выше скорость кристаллизации капли, тем более мелкодисперсной является структура материала, тем выше степень пересыщенного твердого раствора и выше механические и эксплуатационные свойства получаемого гранулированного материала. Важно отметить, что эта фундаментальная закономерность справедлива для всех алюминиевых сплавов, нашедших применение в отечественной металлургии гранул [1]. Зная особенности кристаллизации и скорости кристаллизации можно прогнозировать уровень механических свойств получаемых материалов.

Долгое время единственным методом оценки скорости кристаллизации была величина дендритного параметра микроструктуры гранул (т.е. расстояние между осями вторичных дендритов), определяемая методами микроскопии. Полученные, в свое время, экспериментальные зависимости величины дендритного параметра микроструктуры от скорости кристаллизации для многих алюминиевых сплавов достаточно хорошо описывали особенности процессов кристаллизации [2, 3]. Однако, в последние десятилетия, в связи с активным применением вычислительной техники при прогнозировании свойств материалов получаемых металлургией гранул всё более широко стали применяться разработанные математические модели.

**Исследование состояния вопроса.** Понятно, что математическая модель кристаллизации гранул базируется на решении задачи отвода тепла от расплавленного объекта и в большой степени зависит не только от диаметра гранулы, теплопроводности окружающей среды, но и от особенностей метода гранулирования. Различают несколько видов методов гранулирования алюминиевых сплавов, которые активно применяются как в отечественной, так и в зарубежной металлургии гранул [2, 4]. На рис.1 представлена разработанная классификация промышленно используемых методов получения алюминиевых гранул. Можно выделить следующие особенности указанных методов.

Капельный и вибрационный методы довольно похожи – капля, продавливаясь в отверстие в дне тигля под силой собственной тяжести отделяется и падает в охлаждающую жидкость – воду. Длительность пребывания капли в воздухе можно регулировать изменением расстояния от места формирования капли (как правило это дно тигля с расплавом) до воды.

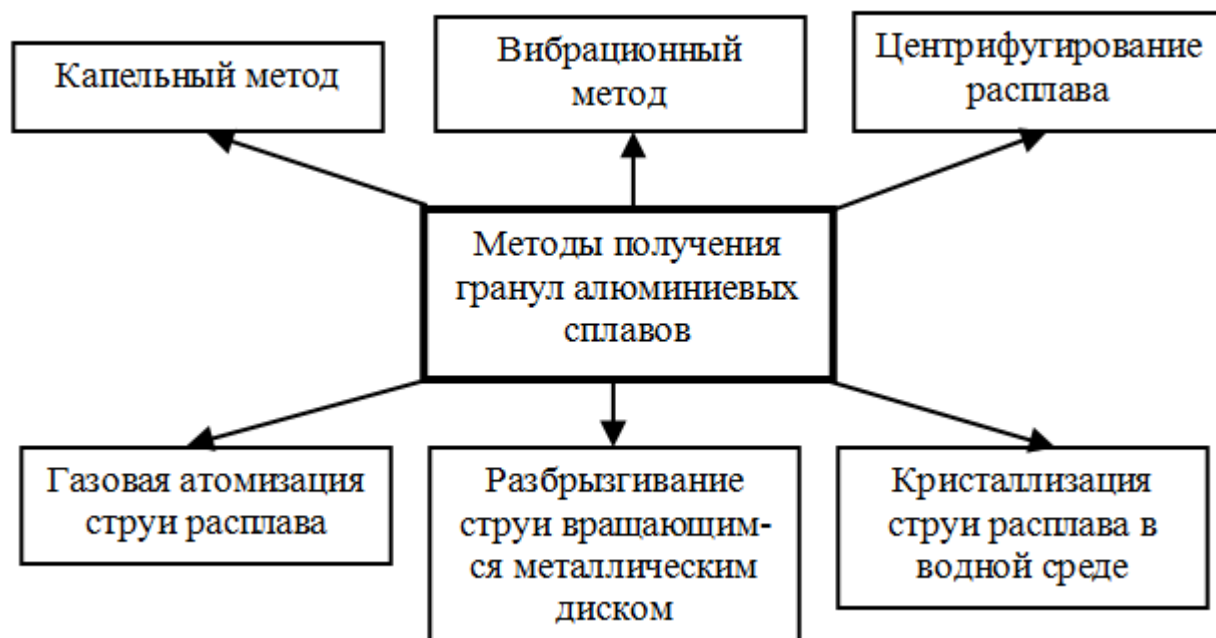


Рисунок 1 – Разработанная классификация методов получения гранул алюминиевых сплавов

Получение гранул центрифугированием расплава также характеризуется коротким временем пребывания капли расплава в воздушной среде с дальнейшим охлаждением капли в водной среде [5].

Газовая атомизация струи расплава осуществляется с применением высокотемпературного потока инертного газа или воздуха, разбивающего струю расплава металла на фрагменты. Они также могут в дальнейшем охлаждаться в водной среде. Данный метод широко применяется в зарубежной практике и обеспечивает получение меньших по диаметру частиц, которые ближе (по размерам) к порошинкам, а не к гранулам (диаметр гораздо менее 1,0 мм) [6].

Очень похож на данный метод и метод кристаллизации струи расплава в водной среде. При этом разбиения на фрагменты потоком воздуха не происходит: расплав кристаллизуется с получением тонкой ленты или проволоки. Возможно разбиение на отдельные фрагменты уже в воде за счет натяжения металла в результате возникновения критической разницы размеров жидкой и твердой фазы расплава [7].

Разбрызгивание струи вращающимся металлическим диском гораздо менее интенсивно применяется в условиях промышленного производства. Так же данный метод имеет отдельную модификацию в сочетании с капельным

методом, когда расплав металла капает на движущуюся лентообразную металлическую охлаждаемую подложку [6, 8].

Существуют различные математические модели кристаллизации, моделирующие численное значение самого главного расчетного показателя и разработанные для каждого из выше рассмотренных способов гранулирования. При построении всех моделей кристаллизации гранул происходит решение тепловой задачи с учетом дополнительного тепла фазовых превращений. При этом учитывают основные факторы, влияющие на интенсивность теплоотвода (рис. 2). Собственно говоря, на этом общие элементы математических моделей и заканчиваются.

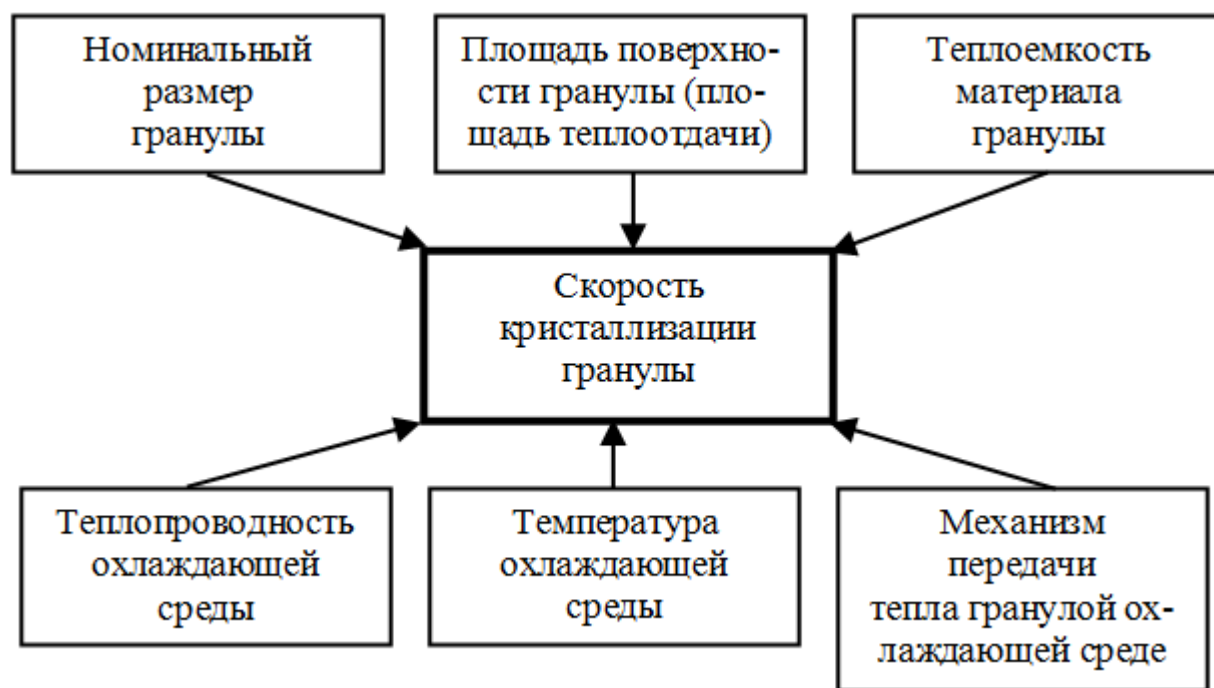


Рисунок 2 – Факторы, влияющие на скорость кристаллизации и особенности затвердевания гранул алюминиевых сплавов

**Методика проведения исследований.** В рамках проводимого комплекса исследований были классифицированы все математические модели, представленные в научной литературе в несколько больших групп. Классификация производилась на основе адекватности математической модели какому-либо промышленному способу получения гранул алюминиевых сплавов. Для каждой группы методов определялись свои особенности и свои закономерности.

С помощью языка программирования высокого уровня Borland C++ были разработаны расчетные системы, в которых заложены все основные закономерности выбранных математических моделей. Далее проводились исследования по определению сходимости результатов математического моделирования и реальных скоростей кристаллизации алюминиевых сплавов, указанных в научной литературе.

Проводились исследования по оценке применимости разработанных и запрограммированных на языке высокого уровня Borland C++ расчетных систем при переходе к другому методу гранулирования.

**Обсуждение полученных результатов.** В результат проведенных теоретических исследований была разработана классификация общеизвестных методов математического моделирования процессов кристаллизации гранул (рис. 3).



Рисунок 3 – Классификация существующих математических моделей кристаллизации гранул

Как видно из анализа рис. 3 можно выделить четыре большие группы методов математического моделирования кристаллизации гранул:

- модели кристаллизации гранул при их свободном падении в воду [4];
- модели кристаллизации гранул при центробежном разбрызгивании или центрифугировании [9];
- модели кристаллизации гранул на металлической подложке (охлаждаемой или не охлаждаемой) [10];
- модели кристаллизации при газовой атомизации [11].

Были сделаны расчеты скоростей кристаллизации по разработанным программам на языке высокого уровня Borland C++. Результаты расчетов сравнивались с известными, экспериментально полученными результатами натурных экспериментов, сведения о которых присутствуют в технической литературе. В подавляющем большинстве расчетные значения и экспериментальные данные довольно хорошо совпадали. Размер отклонений составлял не более 10%. Была проведена проверка предположений, что представленные математические модели хорошо работают только для того одного конкретного метода гранулирования, для которого они изначально и были разработаны [12]. Предположения о применимости разработанных математических моделей только для одного метода гранулирования имеются и в зарубежных научных источниках [3, 13].

Например, известно, что при кристаллизации на металлической охлаждаемой подложке капля имеет вид приплюснутого эллипсоида или сравнительно плоскую форму [8]. Интенсивный отвод тепла ведется именно в направлении подложки. При этом плоская форма капли и ее сравнительно меньшая толщина обеспечивают наиболее интенсивную кристаллизацию только в одном направлении. При гранулировании центрифугированием расплава [5, 7, 9] или разбрызгиванием оплавленной заготовки гранулы и, следовательно, затвердевающие капли расплава, как правило, имеют форму сферы [14, 15]. Это и вносит наибольшие искажения в расчеты. Также определенные искажения вносят моменты прохождения капель расплава границы раздела "воздух – водная среда". Применение расчетных моделей для других методов гранулирования алюминиевых сплавов не дало положительных результатов. Расхождения расчетных скоростей кристаллизации и реальных скоростей кристаллизации алюминиевых сплавов, определенных на основе анализа дендритного параметра были слишком значительны.

**Заключение.** В результате проведенных исследований было установлено отсутствие существования единой математической модели кристаллизации гранул алюминиевых сплавов, которая одинаково бы хорошо работала для всех методов гранулирования. Установлено, что для всех методов гранулирования имеются свои математические модели, которые условно можно разбить на четыре группы, и которые достаточно хорошо работают только для своего метода получения гранул. При переходе к другому методу гранулирования математические модели выдают значения с высокой степенью отклонения.

### 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. Zeoli N., Sai G., Kamnis S. Numerical modelling of metal droplet cooling and solidification // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. No. 51 (15-16), pp: 4121-4131. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.044
4. Скуратов А.П., Пьяных А.А. Расчетное исследование скорости охлаждения капли алюминиевого расплава в водной среде // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1, с. 233-235.
5. Жаров М. В. Исследование влияния увеличения интенсивности теплоотвода при кристаллизации гранул высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu // Цветные металлы. 2022. № 3, с. 82-90. doi: 10.17580/tsm.2022.03.09.
6. Бобылева К.А. Исследование технологий гранулирования алюминиевых сплавов в условиях значительной интенсификации теплоотвода и увеличения скоростей кристаллизации // Научные исследования: итоги и перспективы. 2024. № 1.

7. 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.

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. 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.

10. Попов В. Н., Черепанов А. Н. Численное моделирование кристаллизации модифицированной металлической капли при растекании на подложке // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*. 2019. № 6(87). с. 18-39. doi: 10.18698/1812-3368-2019-6-18-39.

11. Игнатов М.Н., Кулинский А.И., Щепин Л.А. Особенности динамики падения, охлаждения и кристаллизации сферической капли металла в газовой среде // *Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций*. 2002. № 5, с. 65-70.

12. 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.

13. 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. 1455-1465.

14. Жаров М. В. Исследование особенностей технологий получения качественного гранулированного сырья алюминид никеля NiAl // *Цветные металлы*. 2022. № 11, с. 50-56. doi: 10.17580/tsm.2022.11.05.

15. Ciftci N., Ellendt N., Coulthard G. et al. Novel cooling rate correlations in molten metal gas atomization // *Metallurgical and Materials Transactions* 2019. V. 50, pp. 655–677. doi: 10.1007/s11663-019-01508-0.