

УДК 669.713.7

DOI: 10.15372/PMTF202315248

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАПЕЛЬ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

М. В. Жаров

Национальный исследовательский университет “Московский авиационный институт”,  
Москва, Россия

E-mail: MaximZharov@mail.ru

С использованием капельного метода гранулирования и метода центрифугирования расплава рассматриваются физические процессы кристаллизации капель расплава в водной среде. Построена математическая модель, которая на основе исходных данных процесса, диаметра капель расплава, условий охлаждения позволяет определить скорости охлаждения и кристаллизации, а также дендритный параметр структуры гранул исследуемых алюминиевых сплавов. Прогнозирование дендритного параметра микроструктуры гранул позволяет прогнозировать уровень дисперсности микроструктуры и, следовательно, прочностные свойства материала гранулята. В параметрах модели учитывались скорость движения капли, особенности процессов теплоотвода и зависимость теплофизических параметров сред от температуры. Разработана прикладная программа, реализующая построенную математическую модель. Реализация разработанной математической модели проводилась с использованием языка программирования Microsoft Visual C++. Математическая модель апробирована в процессе гранулирования высоколегированных алюминиевых сплавов (сплавы Д1 и Д16 системы Al–Cu–Mg, сплавы В95 и В96Ц системы Al–Zn–Mg–Cu), получаемых с помощью методов центробежного разбрызгивания расплава и капельного метода при охлаждении в водной среде. Скорость кристаллизации в натуральных образцах измерялась на основе анализа дендритного параметра структуры материала. С использованием результатов анализа расчетных значений дендритного параметра и его измерений на реальных образцах гранул доказана высокая степень сходимости результатов математического моделирования и реальных данных.

**Ключевые слова:** технологии гранулирования, охлаждение, кристаллизация, температура кристаллизации, интенсивность отвода тепла, дисперсность микроструктуры, дендритный параметр, капельный метод, метод центрифугирования, скорость движения капли, паровая оболочка, теплопроводность, математическая модель

**Введение.** Как известно, чем больше скорость кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов, тем меньше величина первичных и вторичных дендритов, выше степень дисперсности микроструктуры и степень растворения легирующих элементов в пересыщенном твердом растворе. Это позволяет улучшить механические свойства материала гранул [1]. Скорость кристаллизации зависит от ряда факторов, таких как температура расплава и температура охлаждающей среды, интенсивность теплоотвода, форма частицы, размер гранулы и как следствие масса охлаждаемого расплава и т. д. Известно, что

при центробежном или вибрационном разбрызгивании расплава можно в определенных пределах регулировать размер частиц. Наиболее часто в производстве используются гранулы размером  $1 \div 4$  мм и  $0,3 \div 0,5$  мм [2]. Существует большое многообразие методов гранулирования; однако в промышленных масштабах в России в основном применяются методы гранулирования, основанные на свободном разделении расплава на капли, или методы центрифугирования расплава. При этом в качестве охлаждающей среды используется вода. В зарубежной практике для получения гранул алюминиевых сплавов в основном применяются процессы газовой атомизации. В этом случае в качестве охлаждающей среды используется воздух или инертный газ [1, 3]. С помощью метода газовой атомизации получают гранулы существенно меньшего размера. При этом процесс получения заданной сферической формы гранул и их размеров является неуправляемым. При реализации процесса распыления и охлаждения расплава газом скорость охлаждения при одинаковых размерах частиц меньше, чем при центробежном разбрызгивании в воду. Однако вследствие меньших размеров гранул скорости охлаждения и кристаллизации, полученные с помощью метода газовой атомизации, приближаются к скоростям охлаждения и кристаллизации, достигаемым при центробежном разбрызгивании расплава в воду.

**Состояние проблемы и постановка задачи.** Известно, что использование показателя скорости кристаллизации  $v_{кр}$  при изучении влияния условий охлаждения гранул и частиц разной массы практически невозможно ввиду отсутствия в отливках стационарного участка кристаллизации с постоянной скоростью литья. Поэтому на практике наиболее часто применяется понятие скорости охлаждения  $v_{охл}$ .

При описании процессов кристаллизации слитков или гранул часто используют линейную скорость кристаллизации  $v_{лин}$  (см/с) и объемная скорость кристаллизации  $v_{об}$  ( $c^{-1}$ ). Линейная скорость кристаллизации наиболее часто применяется при описании процесса кристаллизации слитков. В этом случае объемная скорость кристаллизации прямо пропорциональна линейной скорости кристаллизации [1, 2]. При кристаллизации гранул эта зависимость существенно искажается, так как скорость кристаллизации определяется не только теплоотводом от внешней поверхности гранул, но и переохлаждением расплава в процессе кристаллизации. В этом случае объемную скорость кристаллизации  $v_{об}$  определить сложнее, поэтому часто используется пропорциональная ей скорость охлаждения  $v_{охл}$  ( $^{\circ}C/c$ ). В табл. 1 представлено соотношение скоростей кристаллизации и скоростей охлаждения ( $\tau$  — время кристаллизации объекта).

Очевидна взаимосвязь скорости кристаллизации и скорости отвода тепла от гранулы: при изменении скорости охлаждения  $v_{охл}$  пропорционально изменяется объемная скорость кристаллизации  $v_{об}$ . Интенсивность отвода тепла с поверхности капли определяется теплопроводностью охлаждающей среды, градиентом температур капли металла и охлаждающей среды, площадью контакта и т. д. Однако при охлаждении внутренних слоев важную роль играют размеры капли, или, точнее, расстояние от внутренних слоев до поверхности капли, а также условия формирования структуры во всем объеме расплава, в частности неодновременность процесса кристаллизации, размеры двухфазных областей, особенности усадочных процессов [4, 5].

В случае использования классических методов гранулирования максимальные скорости охлаждения достигались при получении частиц порошка (или чешуек). Скорость охлаждения чешуек зависит от их толщины, которая может меняться в диапазоне от десятых долей до сотен микрометров. Считается, что использование метода чешуек при средней их толщине  $50 \div 100$  мкм позволяет достигнуть скорости охлаждения  $v_{охл} = 10^5 \div 10^6$   $^{\circ}C/c$ , а для чешуек меньшей толщины —  $v_{охл} = 10^8$   $^{\circ}C/c$  [2–4]. Таким образом, по сравнению с методом гранулирования метод получения чешуек позволяет значительно (приблизительно на два порядка) увеличить скорость охлаждения. Вместе с тем использование метода

Таблица 1

Значения скоростей кристаллизации и скоростей охлаждения формируемых гранул и частиц порошка [2]

Характеристика объекта	$v_{\text{лин}}$ , см/с	$v_{\text{об}}$ , л/с	$v_{\text{охл}}$ , °С/с	$\tau_{\text{кр}}$ , с
Слиток диаметром 100 мм, получаемый методом непрерывного литья	0,4	1	50	1
Литая проволока диаметром до 6 мм, получаемая при охлаждении водой	10	10	$5 \cdot 10^2$	$10^{-1}$
Гранулы диаметром $1 \div 4$ мм, получаемые при охлаждении водой	—	$10^2$	$5 \cdot 10^3$	$10^{-2}$
Сферические частицы порошка (гранулы) диаметром 500 мкм, получаемые при охлаждении водой	—	$10^3$	$5 \cdot 10^4$	$10^{-3}$
Сферические частицы порошка (гранулы) диаметром менее 50 мкм, получаемые при охлаждении водой	—	$10^4$	$5 \cdot 10^5$	$10^{-4}$
Сферические частицы порошка (гранулы) диаметром 500 мкм, получаемые при охлаждении на воздухе	—	10	$5 \cdot 10^2$	$10^{-1}$
Сферические частицы порошка (гранулы) диаметром 50 мкм, получаемые при охлаждении на воздухе	—	$10^2$	$5 \cdot 10^3$	$10^{-2}$

чешуек связано с рядом трудностей, таких как неоднородность структуры, низкая производительность процесса, малая насыпная масса чешуек, неудобство брикетирования и последующей обработки.

Существует метод определения скоростей кристаллизации гранул на основе анализа дендритного параметра полученной структуры [1, 2, 4]. Известно, что значение дендритного параметра зависит от скорости охлаждения гранул. При этом при различных скоростях охлаждения гранул алюминиевых сплавов (включая случаи получения мелких частиц порошка со скоростью, достигающей значения  $v_{\text{охл}} = 10^6$  °С/с) данная зависимость достаточно точно описывается уравнением

$$d = av_{\text{охл}}^{-n}, \quad (1)$$

где  $d$  — дендритный параметр, мкм;  $a$ ,  $n$  — постоянные коэффициенты, зависящие от условий кристаллизации и химического состава гранулируемых материалов [1, 4].

Известно, что для алюминиевых сплавов параметр  $n$  в большинстве случаев равен  $1/3 \div 1/2$  [2]. Согласно методике расчета, представленной в [1], показатель  $n$  составляет порядка 0,33.

По данным работы [2], зависимость (1) справедлива также для значений скорости охлаждения частиц порошка алюминиевых сплавов  $10^7 \div 10^8$  °С/с, а в ряде случаев и для значений, превышающих  $10^9$  °С/с.

Данная зависимость имеет вид экспоненциальной кривой, часто представляемой в логарифмической системе координат, в которой имеет форму прямолинейного отрезка. В частности, на рис. 1 представлена зависимость дендритного параметра  $d$  от скорости охлаждения  $v_{\text{охл}}$  в логарифмической системе координат  $\lg(d) - \lg(v_{\text{охл}})$  для алюминиевых сплавов типа дуралюмин и сплава В96Ц в дендритном и субдендритном состояниях [1].

Рассмотренная зависимость определена в предположении, что объем кристаллизующейся ветви дендрита  $V_{\text{ден}}$  в пределах одной рассматриваемой ячейки обратно пропорционален скорости охлаждения  $v_{\text{охл}}$ :

$$V_{\text{ден}} = b/v_{\text{охл}} \quad (2)$$

( $b$  — постоянная величина).

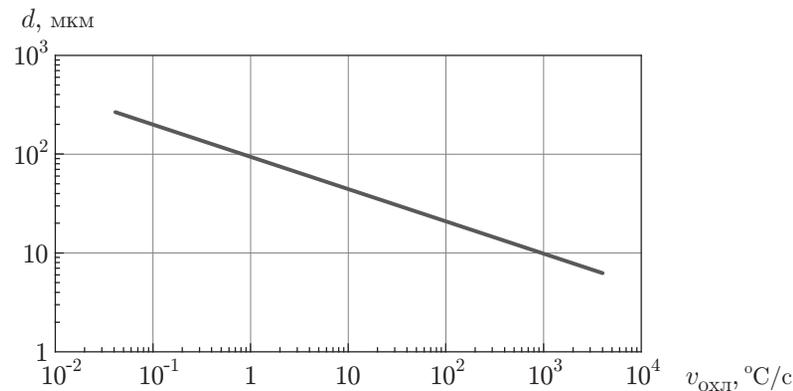


Рис. 1. Зависимость дендритного параметра  $d$  от скорости охлаждения  $v_{\text{охл}}$  в логарифмической системе координат для алюминиевых сплавов типа дуралюмин и В96Ц [1]

Таблица 2

Значения скорости охлаждения и дендритного параметра алюминиевых сплавов при различных методах получения отливок [1, 5]

Метод получения отливок	$v_{\text{охл}}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	$d, \text{ мкм}$
Литье отливок в землю. Литье крупных отливок в изложницы	$10^{-3}$	$10^3$
Непрерывное литье. Литье в кокиль	10	$10^2$
Литье крупных гранул	$10^3$	10
Литье мелких гранул (чешуйки, частицы порошка)	$10^6$	1

В то же время объем  $V_{\text{ден}}$  можно определить как произведение линейных размеров ветви дендрита:

$$V_{\text{ден}} = cd^3 \quad (3)$$

( $c$  — постоянная величина [1]). Приравнивая два уравнения, получаем

$$b/v_{\text{охл}} = cd^3, \quad d = (b/c)^{1/3} v_{\text{охл}}^{-1/3} = av_{\text{охл}}^{-0,33},$$

где  $a$  — постоянный коэффициент, зависящий от условий кристаллизации и химического состава гранулируемых материалов.

Необходимо учесть, что уравнения (2), (3) справедливы для любых материалов, а не только для алюминиевых сплавов. С учетом этого предположения для всех материалов и для любых условий кристаллизации рассматриваемый коэффициент  $n$  всегда должен быть равен 0,33.

В табл. 2 для реализуемых на практике методов получения отливок представлены значения скорости охлаждения и дендритного параметра получаемого материала [1].

Таким образом, зная скорость охлаждения гранулы, можно прогнозировать величину дендритного параметра и, следовательно, свойства материала получаемых гранул. Очевидно, что скорость кристаллизации гранулы прямо пропорционально зависит от скорости охлаждения, т. е. от интенсивности отвода тепла от кристаллизующей капли. Кроме того, необходимо учитывать изменения температуры не только на поверхности, но и во внутренних слоях капли расплава.

Для алюминиевых сплавов в [5] разработана математическая модель охлаждения и кристаллизации капель расплава в условиях газовой атомизации, в которой в качестве

охлаждающей среды используются струи воздуха или инертного газа. Кроме того, известны математические модели охлаждения и кристаллизации капель расплава при их растекании на какой-либо металлической поверхности [6–8]. Также существуют математические модели охлаждения капель расплавов различных металлов и сплавов при их движении в газовых потоках [9–13]. Однако эти модели описывают процессы, происходящие при газовой атомизации расплава, и моделируют процессы теплоотдачи в условиях охлаждения в воздушной или газовой среде. Данные модели имеют в основном теоретический характер и не учитывают специфику методов промышленного получения гранул алюминиевых сплавов. В частности, разработаны математические модели охлаждения и кристаллизации капель при переводе в жидкую фазу потоком высокотемпературного газа части оплавленной заготовки [14, 15], но данные методы не применяются при производстве гранул алюминиевых сплавов.

Полагается, что “... в настоящее время задача определения детального температурного поля кристаллизующейся капли высококонцентрированных алюминиевых расплавов с ограниченной растворимостью легирующего компонента в процессе ее свободного движения в водной охлаждающей среде практически не решалась” [16]. Иными словами, в настоящее время отсутствует математическая модель для определения температурного поля кристаллизующейся капли высоколегированных алюминиевых расплавов в процессе ее свободного движения в охлаждающей среде.

В большинстве случаев на производстве при гранулировании алюминиевых сплавов используется интенсификация процессов охлаждения и кристаллизации расплава в водной среде. Поэтому процесс формирования гранул высоколегированных алюминиевых сплавов представляет собой свободное движение капли расплава в водной или водно-паровой охлаждающей среде.

В случае получения гранул алюминиевых сплавов процесс охлаждения и кристаллизации имеет особенности: малое время пребывания капли расплава в воздушной среде и дальнейшее охлаждение в технической жидкости. При этом основной этап охлаждения и кристаллизации внутренних областей гранул происходит именно в водной или водно-паровой среде.

Таким образом, целью проводимых исследований является определение закономерностей и особенностей изменения температурного поля капель расплава алюминиевых сплавов при охлаждении и кристаллизации в условиях их свободного движения в водной или водно-паровой охлаждающей среде. Это позволит создать математическую модель для определения скоростей охлаждения и кристаллизации капель расплава с целью прогнозирования уровня дисперсности структуры и значения дендритного параметра гранул, а следовательно, свойств получаемого гранулированного материала.

**Исследование особенностей охлаждения и построение математической модели.** При построении математической модели большое значение имеет наличие процесса парообразования при контакте расплавленной капли с водной средой. Анализ процесса кристаллизации и охлаждения гранулы в водной среде в условиях центробежного разбрызгивания показывает, что интенсивный отвод тепла приводит к формированию прослойки паровой среды в тот момент, когда температура гранулы становится больше температуры кипения. Когда температура слоев жидкости, прилежащих к охлаждаемой капле, превышает температуру кипения, жидкость преобразуется в пар. Вследствие того что теплопроводность принимает разные значения, паровая прослойка способствует значительному снижению отвода тепла за счет меньшей теплопроводности паровой среды [17]. Объем паровой прослойки определяется скоростью движения капли в охлаждающей среде (рис. 2).

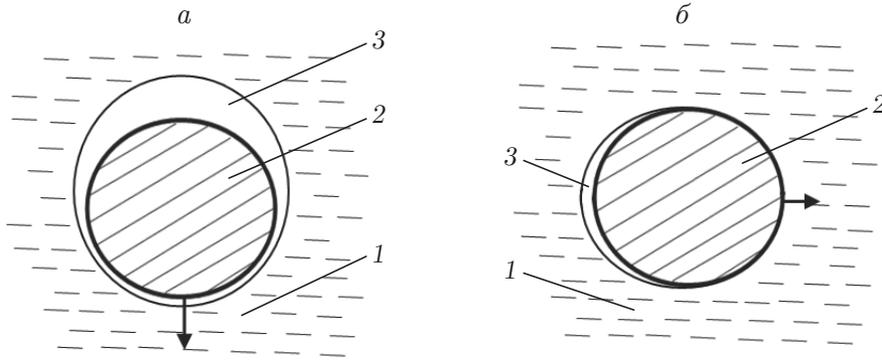


Рис. 2. Схема формирования паровой оболочки вокруг движущейся капли в условиях капельного (вибрационного) способа гранулирования (а) и центробежного разбрызгивания расплава (б):

1 — охлаждающая среда, 2 — капля расплава (гранула), 3 — паровая оболочка

При разработке модели использовались положения, представленные в [16, 18, 19]. Математическая модель процесса охлаждения капли представляет собой систему дифференциальных уравнений неразрывности, сохранения импульса и сохранения энергии. Уравнение энергии включает показатели, характеризующие внутреннее тепловыделение при фазовом переходе в расплаве капли в процессе кристаллизации капли расплава и закипания воды, наиболее часто используемой в качестве охлаждающей жидкости. При учете турбулентности мгновенные значения гидродинамических характеристик записываются в виде суммы статистических средних значений и пульсационных составляющих. Тогда скорости в уравнениях движения определяются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \operatorname{div}(\rho v) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \operatorname{div}(\rho v v) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau} - \rho v' v'),$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \operatorname{div}(\rho v h) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_h, \quad \bar{\tau} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right).$$

Здесь  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К);  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $v'$  — пульсационная составляющая скорости, м/с;  $v$  — скорость, м/с;  $p$  — давление, Па;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $S_h$  — показатель, соответствующий притоку (оттоку) энергии в процессе фазового перехода и излучения с поверхности капли расплава, Вт/м<sup>3</sup>;  $h$  — энтальпия, Дж/кг;  $\bar{\tau}$  — тензор вязких напряжений, Па;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера ( $\delta_{ij} = 0$  ( $i \neq j$ ),  $\delta_{ii} = 1$ ) [16, 18].

Для моделирования турбулентности использовалась гипотеза Буссинеска, связывающая напряжения Рейнольдса  $\rho v' v'$  с осредненным градиентом скоростей. Уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности  $k$  (м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>) и ее диссипации  $\varepsilon$  (м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>) имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \operatorname{div}(\rho v k) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P - \rho \varepsilon,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \operatorname{div}(\rho v \varepsilon) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где  $P$  — скорость генерации турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $\mu_t$  — турбулентная вязкость, Па·с. Эмпирические константы согласно стандартной форме ( $k$ - $\varepsilon$ )-модели имеют значения  $\sigma_k = 1,00$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,30$ ,  $C_1 = 1,44$ ,  $C_2 = 1,92$  [16, 18].



Рис. 3. Комплекс входных и выходных параметров разработанной математической модели для анализа процессов теплоотдачи и кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов

Температура окружающего воздуха принималась равной 20 °С, температура охлаждающей воды — 20 °С, начальная температура капли расплава определялась температурой расплава основной массы металла. Охлаждение капли до момента соприкосновения с водной поверхностью зависело от расстояния до водной среды, скорости движения капли и от конструктивных особенностей установок для получения гранул. Влияние образования пара на теплообмен учитывалось в приближении задачи Стефана, где граница раздела пар — вода определялась при решении уравнений движения и теплообмена. В модели учитывалась зависимость теплофизических параметров сред от температуры. Была разработана прикладная программа, реализующая построенную математическую модель. Реализация математической модели проводилась с применением языка программирования Microsoft Visual C++.

Основная практическая значимость разработанной математической модели для детального анализа процесса кристаллизации гранул заключается в точном определении скоростей охлаждения и скоростей кристаллизации по объему получаемой гранулы. При определении скорости кристаллизации изменялись диаметр гранулы, скорость ее движения в зоне отрыва от основной массы расплава, температура расплава, физические и теплофизические свойства расплава и кристаллизовавшегося материала, условия охлаждения. Зная скорость кристаллизации, можно определить размеры фаз и дендритов, степень перенасыщенности твердого раствора и прогнозировать прочностные характеристики материала. На рис. 3 представлен комплекс входных и выходных параметров предлагаемой математической модели для анализа процессов охлаждения и кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов.

**Методика проведения эксперимента.** С целью определения сходимости результатов математического моделирования и реальных экспериментов проводились исследования процесса получения гранул различного диаметра с помощью различных методов из высоколегированных алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg (сплавы Д1, Д16) и системы Al–Zn–Mg–Cu (сплавы В95, В96Ц). Химический состав сплавов соответствовал требованиям ГОСТ 4784-2019 [20] и ОСТ 1.90048-90 [21]. Гранулы были получены с использованием капельного метода и метода разбрызгивания расплава через перфорированный вращающийся стакан. Конструкция установки для получения гранул капельным методом описана в работе [22], конструкция установки для получения гранул методом центрифугирования расплава — в работе [23]. В работе [24] описаны особенности применяемого метода центрифугирования расплава.

Диаметр гранул, получаемых с помощью капельного метода и метода центрифугирования, варьировался в диапазоне  $1,0 \div 3,5$  мм и определялся диаметром отверстий в тиглях.

Исследование состава фракций гранул показало, что гранулы имеют приблизительно одинаковые размеры и форму (в случае капельного метода — сферическую, в случае метода центрифугирования расплава при скоростях вращения тигля более 4500 об/мин — форму незначительно сплюснутой сферы). На выходе из отверстий тигля гранулы, вероятно, имели вытянутую форму, но вследствие высокой скорости и удара о поверхность воды их форма изменилась. На это указывает то, что диаметры полученных гранул незначительно превышают диаметр выходного отверстия в тигле с расплавом.

При проведении исследований скорость вращения тигля при центрифугировании расплава варьировалась в диапазоне  $700 \div 6500$  об/мин. В ходе исследований установлено, что при скоростях вращения перфорированного тигля и стакана менее 3000 об/мин с использованием способа получения, изложенного в [24, 25], возникает опасность заливания охлаждающей жидкостью тигля и стакана; размеры водной воронки, возникающей вокруг вращающихся нагретых деталей установки, критически малы. Для предотвращения данной опасности при скоростях вращения менее 3000 об/мин требовалось поднимать вращающиеся тигель и стакан над поверхностью воды. При этом длина траектории и время движения капель расплава в воздухе резко увеличивались, в результате резко уменьшалась скорость движения частицы металла в охлаждающей жидкости.

Проводились исследования микроструктуры полученных гранул с целью определения значений дендритного параметра. Скорости охлаждения и скорости кристаллизации вычислялись с помощью метода определения дендритного параметра структуры [1, 2, 4], а для сплава В96Ц также с применением данных, представленных на рис. 1 [1]. Микроструктура гранул исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа марки S-3400N фирмы Hitachi high-technologies corporation.

**Анализ полученных результатов.** При использовании математической модели установлено, что максимальное влияние на скорости охлаждения и кристаллизации капель расплава оказывали следующие параметры процесса: 1) диаметр получаемых гранул; 2) местоположение рассматриваемых слоев (центральные или периферийные слои гранулы); 3) скорость движения капли расплава при ее попадании в охлаждающую жидкость (наличие или отсутствие эффекта “паровой рубашки”).

Наиболее существенное влияние оказывает значение диаметра получаемых гранул, причем скорости охлаждения и кристаллизации даже на поверхности гранулы существенно увеличивались при уменьшении диаметра гранулы. Предположительно, основное влияние оказывал не диаметр, а объем капли расплава, а также накопленная внутри всей капли теплота и интенсивность теплопередачи внутри капли.

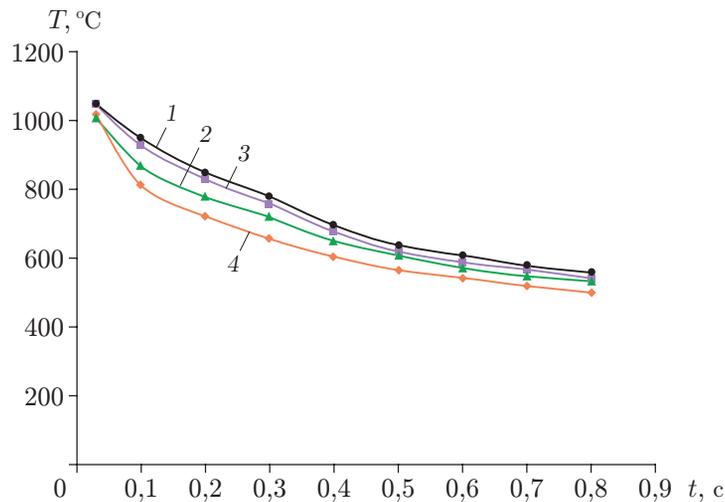


Рис. 4. Максимальная (1, 3) и минимальная (2, 4) температуры капле расплава (гранул) сплава Д16 различного диаметра:

1, 2 —  $D = 3,5$  мм, 3, 4 —  $D = 1,5$  мм

При моделировании процесса охлаждения капли в первую очередь определялось изменение температурного поля исследуемого объекта при его движении в воздушной среде до соприкосновения с поверхностью жидкости. Причем в случае использования капельного метода рассматривалось свободное падение капли только под действием силы тяжести, а в случае использования метода центрифугирования рассматривались скорость и траектория движения, созданная центробежной силой и силой тяжести. Сопротивлением воздуха пренебрегалось. Установлено, что расстояние от тигля с расплавленным металлом, которое варьировалось в диапазоне  $50 \div 250$  мм, незначительно влияет на процесс теплоотдачи и охлаждения. Уменьшение температуры на поверхности гранул составляло порядка  $10 \div 20$  °С. Расчет в математической модели ведется во всем диапазоне размеров (диаметров) получаемых гранул, однако контрольные размеры соответствовали диаметрам гранул, получаемых в реальном процессе гранулирования, и составляли 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 мм.

На рис. 4 показана динамика охлаждения капле расплава (гранул) сплава Д16 при гранулировании капельным методом (температура исходного расплава 1050 °С, диаметр гранул  $D = 1,5; 3,5$  мм). Расчетное время полной кристаллизации для гранул диаметром 3,5 мм составляет  $0,20 \div 0,25$  с, для гранул диаметром 1,5 мм —  $0,10 \div 0,15$  с.

В рассматриваемом случае максимальная скорость охлаждения в начальный момент времени (момент попадания капли в жидкую среду)  $\tau = 0 \div 0,10$  с составляет: для капле расплава диаметром 3,5 мм — 1340 °С/с, для капле расплава диаметром 1,5 мм — 1535 °С/с. Средняя скорость охлаждения (до полной кристаллизации) составляет для капле расплава диаметром 3,5 мм — 730 °С/с, для капле расплава диаметром 1,5 мм — 810 °С/с. На рис. 4 видно, что с течением времени скорость охлаждения резко уменьшается. Причем динамика охлаждения внешних слоев металла для капле диаметром 1,5 и 3,5 мм сопоставима, а при охлаждении внутренних слоев для капле диаметром 1,5 мм наблюдается более интенсивная теплоотдача. Данные результаты хорошо коррелируют с теоретическими положениями [1, 2, 4, 26].

При значительном увеличении скорости движения гранулы в охлаждающей среде при центрифугировании расплава в условиях отрыва паровой оболочки, возникающей вокруг кристаллизующейся гранулы, наблюдается резкое увеличение скоростей охлаждения. При

Таблица 3

Значения расчетных средней  $v_{\text{охл}}^{\text{cp}}$  и максимальной  $v_{\text{охл}}^{\text{max}}$  ( $\tau = 0 \div 0,1$  с) скоростей охлаждения гранул в условиях гранулирования методом центрифугирования при температуре исходного расплава  $1050$  °С и скорости вращения тигля  $4500$  об/мин

$D$ , мм	$v_{\text{охл}}^{\text{cp}}$ , °С/с	$v_{\text{охл}}^{\text{max}}$ , °С/с
1,5	2140	2985
2,0	1675	2510
2,5	1430	2170
3,0	1175	1930
3,5	1020	1775

этом для гранулирования алюминиевых сплавов скорость вращения тигля, в котором предусмотрены отверстия, должна быть более  $4000$  об/мин. Такая скорость вращения тигля создает достаточную начальную скорость поступательного движения капли в момент отрыва от основной массы расплава или при выдавливании капли за счет центробежной силы через боковые отверстия тигля. Данная начальная скорость обеспечивает эффективный отрыв паровой оболочки, возникающий за счет нагрева близлежащих к капле слоев охлаждающей жидкости. В табл. 3 представлены расчетные скорости охлаждения капель сплава Д16 в условиях центрифугирования расплава со скоростью вращения перфорированного тигля  $4500$  об/мин.

Была исследована сходимость результатов, полученных по разработанной математической модели, и результатов экспериментов. На рис. 5 представлены значения среднего дендритного параметра микроструктуры гранул, полученные расчетным путем по предлагаемой математической модели и в экспериментах при различных условиях.

Значения дендритного параметра полученных гранулированных материалов рассматриваемых сплавов изменялись в диапазоне  $5,5 \div 11,0$  мкм и зависели от таких параметров, как диаметр гранулы, местоположение рассматриваемых слоев, условия охлаждения гранул. Установлено, что значение постоянного коэффициента  $a$  в зависимости от метода гранулирования для исследуемых сплавов меняется в диапазоне  $90 \div 115$ . Исследования показали достаточно высокую степень сходимости результатов расчетов по математической модели и данных эксперимента.

Для определения сходимости использовалась величина относительного отклонения значения дендритного параметра, рассчитанного по математической модели, от реального значения, полученного с использованием различных промышленных методов гранулирования. Расчет относительного отклонения  $\delta$  проводился по формуле

$$\delta = [(d_1 - d_0)/d_0] \cdot 100 \%,$$

где  $d_1$  — расчетное значение дендритного параметра структуры материала, получаемое по математической модели, мкм;  $d_0$  — среднее значение дендритного параметра зерен микроструктуры отлитых гранул, мкм.

Величина отклонения дендритного параметра составляла  $\delta \approx 9-17$  %, что не превышает стандартной статистической погрешности.

Разработанная модель была адаптирована для определения параметров процессов охлаждения и кристаллизации гранул моноалюминид никеля NiAl. Однако данный вопрос требует дальнейших исследований, так как при гранулировании моноалюминид никеля NiAl, а также жаропрочных никелевых сплавов основными промышленными методами получения гранул, точнее, частиц порошка диаметром до  $1,0$  мм являются методы газовой атомизации или центробежного разбрызгивания вращающегося электрода [27, 28]. При этом охлаждающей средой всегда является не водная среда, а воздух или инертный газ.

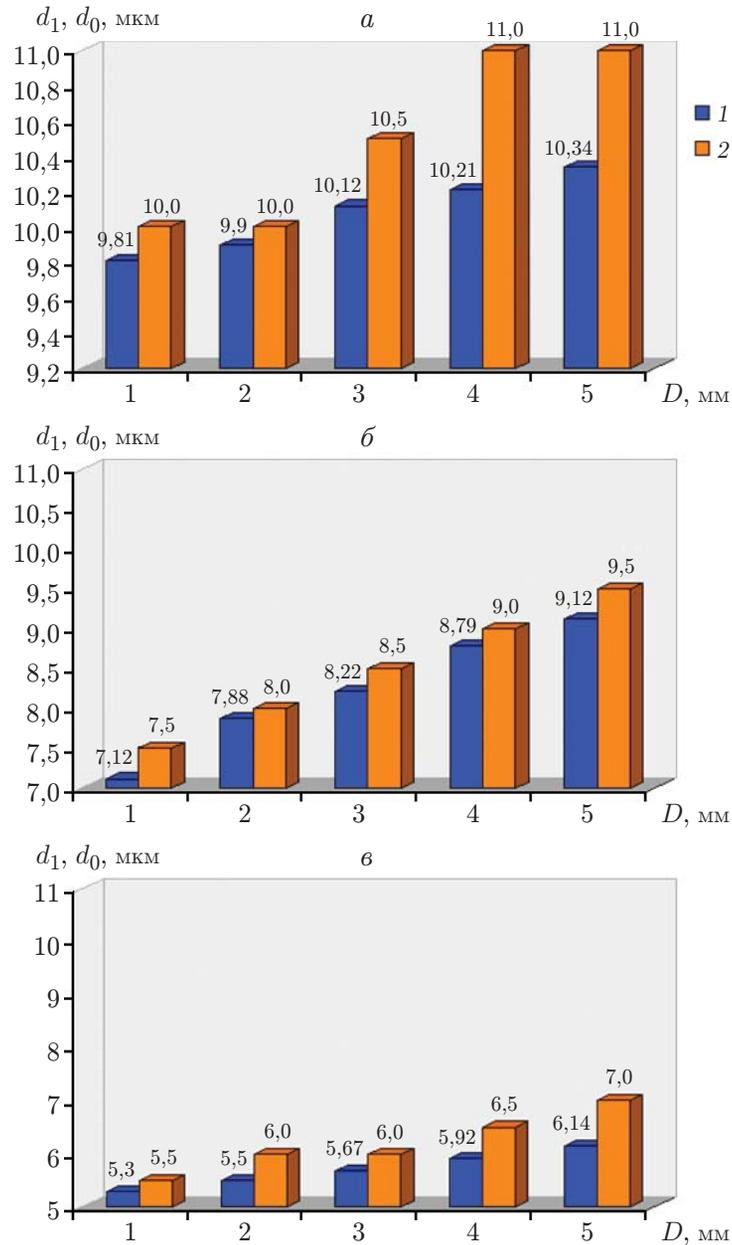


Рис. 5. Значения дендритных параметров, полученные по разработанной математической модели (1) и в экспериментах (2) для сплава Д16 системы Al–Cu–Mg, при использовании различных способов получения гранул:

*a* — капельный способ, *б* — центрифугирование расплава при скорости вращения тигля-разбрызгивателя 4500 об/мин, *в* — центрифугирование расплава при скорости вращения тигля-разбрызгивателя 6500 об/мин

**Заключение.** В работе проведен анализ закономерностей охлаждения и кристаллизации капель алюминиевых сплавов при капельном методе гранулирования и центрифугирования расплава с охлаждением в водной среде.

Предложена физико-математическая модель охлаждения и кристаллизации капель расплава при гранулировании алюминиевых сплавов капельным методом и методом центрифугирования из тигля с перфорированными отверстиями с охлаждением в водной и водно-паровой среде.

Разработана программа для расчета параметров теплоотвода в процессе охлаждения и кристаллизации капель расплава, расчета прогнозируемой величины дендритного параметра при использовании различных методов гранулирования и параметров процесса.

Проведена апробация разработанной математической модели для проверки сходимости результатов, полученных расчетным и экспериментальным путем. В качестве материалов для исследований было выбрано несколько групп алюминиевых сплавов, в частности высоколегированные алюминиевые сплавы Д1, Д16 (системы Al–Cu–Mg) и сплавы В95, В96Ц (системы Al–Zn–Mg–Cu). В качестве критерия сходимости использовалось соотношение расчетного и фактического значений дендритного параметра структуры полученных гранул.

Исследования показали достаточно высокую степень сходимости результатов расчета по предложенной математической модели и результатов экспериментов. Величина отклонения составила 9–17 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

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.** Гранулируемые алюминиевые сплавы / В. И. Добаткин, В. И. Елагин. М.: *Металлургия*, 1981.
3. **Добаткин В. И.** Закономерности структурообразования при быстрой кристаллизации легких сплавов // *Материаловедение, литье и обработка легких сплавов*. М.: *ВИЛС*, 1986. С. 3–18.
4. **Колпашников А. И.** Гранулированные материалы / А. И. Колпашников, А. В. Ефремов. М.: *Металлургия*, 1977.
5. **Zeoli N., Gu S., Kamnis S.** Numerical modelling of metal droplet cooling and solidification // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2008. V. 51, N 15/16. P. 4121–4131. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.044.
6. **Попов В. Н., Черепанов А. Н.** Численное моделирование кристаллизации модифицированной металлической капли при растекании на подложке // *Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки*. 2019. № 6. С. 18–39. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-6-18-39.
7. **Таран Ю. А.** Математическое описание процесса гранулирования расплавов на охлаждаемых поверхностях // *Теорет. основы хим. технологии*. 2022. Т. 56, № 6. С. 748–759.
8. **Yi Hao, Qi Lehua, Luo Jun, et al.** Effect of the surface morphology of solidified droplet on remelting between neighboring aluminum droplets // *Intern. J. Machine Tools Manufacture*. 2018. V. 130/131. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2018.03.006.
9. **Игнатов М. Н., Кулинский А. И., Щепин Л. А.** Особенности динамики падения, охлаждения и кристаллизации сферической капли металла в газовой среде // *Вестн. Перм. гос. техн. ун-та. Механика и технология материалов и конструкций*. 2002. № 5. С. 65–70.
10. **Кузьмин Р. Б., Михатулин Д. С., Полежаев Ю. В. и др.** Исследование затвердевания капель расплава в высокоскоростном потоке холодного газа // *Теплофизика высоких температур*. 1997. Т. 35, вып. 3. С. 504–507.

11. **Xia Y., Khezzar L., Alshehhi M., Hardalupas Y.** Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer // Intern. J. Multiphase Flow. 2017. V. 94. P. 31–43.
12. **Wang Peng, Li Jing, Wang Xin, Du Bo-rui.** Impact mechanism of gas temperature in metal powder production via gas atomization // Chinese Phys. B. 2020. V. 30, N 5. 054702. DOI: 10.1088/1674-1056/abd75e.
13. **Bergmann D., Fritsching U., Bauckhage K.** A mathematical model for cooling and rapid solidification of molten metal droplets / Intern. J. Thermal Sci. 2000. N 39. P. 53–62. DOI: 10.1016/S1290-0729(00)00195-1.
14. **Bojarevics V., Roy A., Pericleous K.** Numerical model of electrode induction melting for gas atomization // Intern. J. Comput. Math. Electric. Electron. Engng. 2011. V. 30, N 5. P. 1455–1466.
15. **Ciftci N., Ellendt N., Coulthard G., et al.** Novel cooling rate correlations in molten metal gas atomization // Metallurg. Materials Trans. B. 2019. V. 50. P. 655–677. DOI: 10.1007/s11663-019-01508-0.
16. **Скуратов А. П., Пьяных А. А.** Теплообмен при гранулировании свинцовосодержащих алюминиевых сплавов в водной среде // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 2. С. 155–162.
17. **Жаров М. В.** Процессы получения гранулированных материалов из алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu по технологии сверхбыстрой кристаллизации гранул // Metallurg. 2022. № 3. С. 39–49. DOI: 10.52351/00260827\_2022\_03\_39.
18. **Скуратов А. П., Пьяных А. А.** Расчетное исследование скорости охлаждения капли алюминиевого расплава в водной среде // Науч. пробл. транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 233–235.
19. **Lauder В. Е.** Lectures in mathematical models of turbulence / В. Е. Launder, D. В. Spalding. L.: Acad. Press, 1972.
20. **ГОСТ 4784-2019.** Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Введ. 1.09.2019. М.: СтандартИнформ, 2019.
21. **ОСТ 1.90048-90.** Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Введ. 1.02.1991.
22. **Пат. 2032498 RU, МПК<sup>6</sup> В 22 F 9/06.** Способ получения сферических гранул / В. Б. Анкудинов, Ю. А. Марухин. Опубл. 10.04.1995.
23. **Пат. 2125923 RU, МПК<sup>6</sup> В 22 F 9/10.** Устройство для получения металлических гранул / М. Б. Силин, М. В. Жаров. Опубл. 10.02.1999.
24. **Пат. 2117556 RU, МПК<sup>6</sup> В 22 F 9/10.** Способ получения металлических гранул / М. Б. Силин, М. В. Жаров. Опубл. 20.08.1998.
25. **Жаров М. В.** Разработка технологии производства гранулированных материалов с ультрадисперсной структурой из высокопрочных алюминиевых сплавов // Вестн. машиностроения. 2022. № 8. С. 49–55. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-8-49-55.
26. **Mullis A., Farrell L., Cochrane R., Adkins N. J. E.** Estimation of cooling rates during close-coupled gas atomization using secondary dendrite arm spacing measurement // Metallurg. Materials Trans. 2013. V. 44, N 4. P. 992–999. DOI: 10.1007/s11663-013-9856-2.
27. **Liu W., Wang G. X., Matthys E. F.** Thermal analysis and measurements for a molten metal drop impacting on a substrate: cooling, solidification and heat transfer coefficient // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1995. V. 38, iss. 8. P. 1387–1395. DOI: 10.1016/0017-9310(94)00262-T.
28. **Жаров М. В.** Анализ технологических процессов производства сферических порошков и гранул моноалюминида никеля NiAl для нужд отечественного двигателестроения // Вопр. материаловедения. 2022. № 3. С. 29–40. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-29-40.

*Поступила в редакцию 25/І 2023 г.,  
после доработки — 19/ІV 2023 г.  
Принята к публикации 24/ІV 2023 г.*