

УДК 669.017

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

ДЕЙНЕКО Л.Н.<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
РОМАНОВА Н.С.<sup>2\*</sup>, к.т.н., доц.,  
КОКАШИНСКАЯ Г.В.<sup>3</sup>, ст.препод.  
УШАКОВ Ю.Н.<sup>4</sup>, асс.

<sup>1</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепрпетровск, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: [leonid\\_deyneko@mail.ru](mailto:leonid_deyneko@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

<sup>2\*</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепрпетровск, Украина, тел. +38 (097) 523-52-58, e-mail: [rnsrns@i.ua](mailto:rnsrns@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

<sup>3</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепрпетровск, Украина, тел. +38 (067) 298-42-10, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7822-7657

<sup>4</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепрпетровск, Украина, тел. +38 (066) 110-64-63, e-mail: [UshakovYuriy@i.ua](mailto:UshakovYuriy@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-2310-1678

**Аннотация. Постановка проблемы.** Получение поршневых сплавов на основе алюминия с новыми или улучшенными физико-механическими свойствами возможно путем формирования неравновесного/метастабильного структурно-фазового состава. Изменить фазовый состав и структуру можно с помощью высоких скоростей охлаждения при кристаллизации в рамках технологии порошковой и гранульной металлургии. **Цель работы.** Провести аналитическую оценку значений скоростей охлаждения (рассчитанных или полученных экспериментально), которые реализуются при гранулировании расплавов на основе Al в атмосфере воздуха и в водо-воздушной среде. **Основная часть.** В статье анализируются экспериментальные данные, а также данные расчетов скоростей охлаждения гранул (диаметром от 0.1 до 2.0 мм) сплавов на основе алюминия с учетом различных граничных условий. Приведен анализ оценки величины переохлаждения расплава перед фронтом кристаллизации в зависимости от скорости охлаждения гранул. **Выводы.** Показано, что экспериментальные данные согласуются с расчетными алгоритмами оценки скоростей охлаждения гранул в интервалах температур кристаллизации 800-600°C, а также с эмпирическими формулами по оценке скорости охлаждения гранул в зависимости от их размера.

**Ключевые слова:** сплавы на основе алюминия; гранулированный сплав; скорость охлаждения гранул; переохлаждение расплава.

## ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ШВИДКОСТЕЙ ОХОЛОДЖЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

ДЕЙНЕКО Л.М.<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
РОМАНОВА Н.С.<sup>2\*</sup>, к.т.н., доц.,  
КОКАШИНСЬКА Г.В.<sup>3</sup>, ст.викладач,  
УШАКОВ Ю.М.<sup>4</sup>, ас.

<sup>1</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: [leonid\\_deyneko@mail.ru](mailto:leonid_deyneko@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

<sup>2\*</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 745-31-56, e-mail: [rnsrns@i.ua](mailto:rnsrns@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

<sup>3</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (067) 298-42-10, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7822-7657

<sup>4</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (066) 110-64-63, e-mail: [UshakovYuriy@i.ua](mailto:UshakovYuriy@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-2310-1678

**Постанова проблеми.** Отримання поршневих сплавів на основі алюмінію з новими або покращеними фізико-механічними властивостями можливо шляхом формування нерівноважного / метастабільного структурно-фазового складу. Змінити фазовий склад і структуру можна за допомогою високих швидкостей охолодження при кристалізації в рамках технології порошкової і гранульної металургии. **Мета роботи.** Провести аналітичну оцінку значень швидкостей охолодження (розрахованих або отриманих експериментально), які реалізуються при гранулюванні розплавів на основі Al в

атмосфері повітря і в водо-повітряному середовищі. **Основна частина.** У статті аналізуються експериментальні дані, а також дані розрахунків швидкостей охолодження гранул (діаметром від 0.1 до 2.0 мм) сплавів на основі алюмінію з урахуванням різних граничних умов. Наведено аналіз оцінки величини переохолодження розплаву перед фронтом кристалізації в залежності від швидкості охолодження гранул. **Висновки.** Показано, що експериментальні дані узгоджуються з розрахунковими алгоритмами оцінки швидкостей охолодження гранул в інтервалах температур кристалізації 800-6000С, а також з емпіричними формулами по оцінці швидкості охолодження гранул в залежності від їх розміру.

*Ключові слова:* сплави на основі алюмінію; гранульований сплав; швидкість охолодження гранул; переохолодження розплаву

## THERMAL FEATURES AND TECHNIQUES OF ASSESSMENT OF COOLING RATES OF GRANULATED ALUMINIUM ALLOYS

DEINEKO L.N.<sup>1</sup>, Dr.Sc.(Tech.), Prof  
 ROMANOVA N.C.,<sup>2\*</sup>, PhD, ass.prof  
 KOKASHINSKAYA G.V.<sup>3</sup>, (Senior Lecturer)  
 USHAKOV Y.N.,<sup>4</sup> (Assistant Lecturer)

<sup>1</sup>Heat Treatment Department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina prosp., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: [leonid\\_deyneko@mail.ru](mailto:leonid_deyneko@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

<sup>2\*</sup>Heat Treatment Department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina prosp., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 523-52-58, e-mail: [rnsrns@i.ua](mailto:rnsrns@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

<sup>3</sup>Heat Treatment Department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina prosp., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (067) 298-42-10, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7822-7657

<sup>4</sup>Heat Treatment Department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina prosp., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (066) 110-64-63, e-mail: [UshakovYuriy@i.ua](mailto:UshakovYuriy@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-2310-1678

**Summary. Statement of a problem.** Receiving piston alloys on the basis of aluminum with the new or improved physical and mechanical properties is possible by formation of nonequilibrium / metastable structural and phase composition. It is possible to change phase composition and structure by means of high cooling rates during crystallization with help of technology of powder and granular metallurgy. **Research objective.** To carry out analytical assessment of values of cooling rates (calculated or received experimentally) which are implemented by means of granulation of Aluminum alloys in the atmosphere of air and in the air-and-water environment. **Main part.** In article the experimental data, and data of calculations of cooling rates of granules (diameter from 0.1 to 2.0 mm) of alloys on the basis of aluminum with various boundary conditions are analyzed. The analysis of assessment of size of overcooling of a melt before the front of a crystallization depending on cooling rate of granules is carried out. **Conclusions.** It is shown that the experimental data will be coordinated with calculated algorithms of assessment of cooling rates of granules in intervals of crystallization temperatures 800-6000C, and also with empirical formulas according to cooling rate of granules depending on their size.

*Keywords:* alloys on the basis of aluminum; cooling rate, granulated alloy; analysis of phase composition; overcooling of a melt

### Постановка проблемы

Один из эффективных методов влияния на структуру и свойства алюминиевых сплавов связан с высокоскоростной кристаллизацией из расплава. Иногда этот метод называют закалкой из жидкого состояния. Технология получения гранулируемых алюминиевых сплавов позволяет реализовать возможности этого метода на производстве. Процесс гранулирования связан с диспергированием струи расплава. При этом скорость охлаждения при кристаллизации является основным технологическим фактором, который определяет и величину переохлаждения расплава, и скорость кристаллизации, а также кинетические параметры процесса (коэффициенты распределения элементов перед фронтом кристаллизации и коэффициенты диффузии в твердом и жидком состояниях). Если не рассматривать вопросы строения расплава, которые являются предметом специального исследования, и

проводит кристаллизацию в идентичных условиях, определяющих состояние расплава, то можно с уверенностью сказать, что скорость охлаждения определяет фазовый состав и структуру сплава. Поэтому очень важно правильно оценивать и измерять скорость охлаждения при кристаллизации, как один из основных технологических факторов, определяющий фазовый состав, структуру и свойства сплава.

### Основная часть

*Расчет и оценка скорости охлаждения при закалке сплавов алюминия из жидкого состояния.*

В металлургии гранул в настоящее время технологически разработанными и освоенными являются скорости охлаждения порядка  $10^3 - 10^7$  град/с (фирмы Allied Signal, ALCOA, Pratt and Whitney, Alcan, КраМЗ г. Красноярск) [4, 5, 6, 7]. На лабораторно-экспериментальных установках достигнуты скорости охлаждения  $10^9 - 10^{10}$  град/с [4,

8, 9, 10], а при атомарном осаждении на криогенную подложку до  $10^{15}$  град/с [11,10]. Наиболее освоенными и технологически перспективными способами высокоскоростного охлаждения расплавов являются кристаллизация пленок на массивной высокотеплопроводной подложке и охлаждение каплей расплава в жидкой или плотной газовой среде. Закалка гранул в жидкой или плотной газовой среде позволяет получить на алюминиевых сплавах скорость охлаждения порядка  $10^3 \dots 10^5$  град/с. Инженерные расчеты аэродинамики и гидродинамика частиц, полученных центробежным распылением расплава достаточно хорошо проработаны и общая методика проектных расчетов при заданной геометрии распылителя (диска, чаши, перфорированного стакана), числе его оборотов и начальной температуре металла включает определение следующих параметров:

- 1) Расчет фракционного состава (диаметра образующихся капель);
- 2) Определение координаты и скорости частицы, соответствующие началу и окончанию процесса её кристаллизации;
- 3) Определение зависимостей изменения температуры и скорости движения капли во времени;
- 4) Расчет коэффициента теплоотдачи;
- 5) Расчет скорости охлаждения;
- 6) Расчет продолжительности периодов охлаждения и кристаллизации.

В приближенных расчетах можно задаваться средними значениями температуры газа (или жидкости), а уравнения движения и теплообмена решать раздельно. При этом сначала из уравнений движения находят скорость частицы относительно газового потока, которую используют для определения коэффициента теплоотдачи, скорости охлаждения и продолжительности периодов охлаждения и кристаллизации [12, 13]. Согласно [22] расчет скорости охлаждения частиц в плотной газовой среде осуществляется при граничных условиях III рода (возможен расчет и по алгоритму термически тонкого тела, когда перепад температуры по сечению гранулы пренебрежимо мал). Как показывают расчеты при граничных условиях III рода  $V_{охл}$  пропорциональна  $\sim 1/d^{1.5-2.0}$ , где  $d$  – диаметр гранулы. Кроме того, скорость охлаждения зависит от скорости движения гранулы относительно газа, его давления и теплофизических свойств газа и металла. Так при центробежном гранулировании алюминиевых сплавов в аргоне и гелии, скорость охлаждения гранул диаметром 200мкм находится на уровне  $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$  град/с. А при  $d = 20$  мкм, достигает значений  $3 \cdot 10^5 - 10^6$  град/с. Следует отметить, что указанные скорости охлаждения гранул в газовой среде примерно на три порядка ниже максимально возможной скорости охлаждения, соответствующей граничным условиям I рода, при которых температура поверхности гранул равна

температуре окружающей среды, а перепадом температуры по сечению нельзя пренебречь.

Процесс охлаждения металлических гранул в случае центробежного гранулирования может проходить либо полностью в газообразной среде, либо с предварительным охлаждением на воздухе и окончательным охлаждением в воде. Условия охлаждения каплей в воздухе связаны со скоростью их полета. Авторы работы [15] предлагают с некоторыми допущениями считать, что охлаждение алюминиевой гранулы в воздушной среде происходит равномерно по всему объему. Время охлаждения гранулы в заданном интервале температур ( $\Delta t$ ) может быть определено по формуле

$$\tau_{охл} = \frac{\Delta H d^2 \rho}{3\lambda \Delta t Nu} \quad (1)$$

Где  $\tau_{охл}$  - время охлаждения гранул;

$\Delta H$  - разность теплосодержаний единицы массы металла в температурном интервале охлаждения;

$d$  – диаметр гранул;

$\rho$  – плотность металла;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха;

$\Delta t$  – температурный интервал охлаждения;

$Nu$  – критерий Нуссельта, имеющий известную зависимость от скорости движения гранулы в воздухе и теплофизических свойств воздуха.

Исходя из этого были рассчитаны время и скорость охлаждения алюминиевой гранулы на воздухе в интервале температур 800-600 °С и в диапазоне линейных скоростей 5-10 м/с на момент отрыва капли при центрифугировании расплава. При указанных условиях гранулы успевают охладиться за время 0,7 и 0,6 с со скоростью 200 и 230 град/с. Скорость охлаждения гранул в воде значительно выше, чем в газообразной среде (при прочих равных условиях) и измеряется тысячами градусов в секунду. Кривые охлаждения гранул алюминия при погружении в воду, снятые с помощью осциллографа, приведены на рис 1

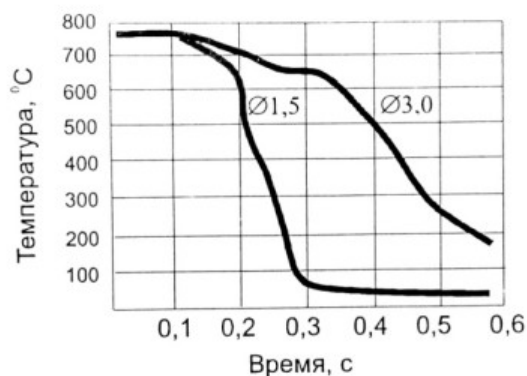


Рис. 1 Кривые охлаждения алюминиевых гранул диаметром 1,5 и 3,0 мм в воде [15] / Cooling curves of aluminum granules with a diameter of 1,5 and 3,0 mm in water

Согласно приведенным данным в интервале 600-100°C достигается скорость охлаждения 2500 град/с для гранул диаметром 3,0 мм и 5500 град/с для гранул диаметром 1,5 мм.

Кроме расчетных методов оценок скоростей сверхбыстрого охлаждения на основе уравнений теплоотдачи, теплопроводности, а также полуэмпирических уравнений (на основе оценки времени затвердевания и знания начальной температуры расплава и конечной температуры продукта закалки), к настоящему времени накоплен большой эмпирический материал по взаимосвязи высоких скоростей охлаждения с микроструктурой сплавов.

Наиболее известные методы оценки скорости охлаждения основаны на взаимосвязи скорости охлаждения с междендритным параметром:

$$V_{\text{охл}}^{\alpha} \cdot D = C \quad (2)$$

Где  $V_{\text{охл}}$  – скорость охлаждения

$\alpha$  – эмпирический показатель (0,32-0,33)

$D$  – расстояние между вторичными ветвями дендритов

$C$  – константа, слабо меняющаяся для сплавов на основе данного металла.

В логарифмических координатах зависимость междендритного параметра от скорости охлаждения прямо пропорциональна и линейна. Эта зависимость строится по прямым определениям скорости охлаждения и расстояния между ветвями второго порядка. Сначала эта зависимость успешно использовалась для скоростей охлаждения  $10^3 - 10^4$  град/с, затем она была распространена и на более высокие скорости охлаждения в интервале кристаллизации, в частности для алюминиевых сплавов до  $10^{10}$  К/с [4].

Другим методом оценки и проверки скорости охлаждения для эвтектических сплавов в интервале кристаллизации может быть анализ взаимосвязи толщины фазовых пластин в эвтектической колонии со скоростью движения фазовой границы жидкость/твердое состояние. Эта зависимость выражается уравнением [10]:

$$h^2 \cdot |V_{\text{крист}}| = C \quad (3)$$

Где  $h$  – толщина фазовых пластин;

$V_{\text{крист}}$  – скорость движения фазовой границы жидкость/твердое состояние;

$C$  – константа, зависящая от природы сплава.

С повышением скорости охлаждения увеличивается скорость перемещения фазовой границы и, соответственно, уменьшается толщина пластин эвтектики.

Экспериментальное определение достаточно высоких скоростей охлаждения гранул и порошков с помощью термопар связано с рядом особенностей. В частности начинает проявлять себя такое явление, как инерционность термопар. При малых скоростях охлаждения (при установившемся процессе теплообмена) запаздывание в показаниях температуры регистрирующим устройством не будет оказывать влияния на величину определяемой скорости охлаждения. Согласно основным положениям теории тепловой инерции [16,17] запаздывание в показаниях термопары при больших скоростях охлаждения определяется формулой:

$$T_{\text{распл}} - T_{\text{терм}} = (T_{\text{терм}}^{\text{н}} - T_{\text{распл}}^{\text{н}} - b \cdot \vartheta) \cdot e^{\tau/\vartheta} + b \cdot \vartheta \quad (4)$$

Где  $T_{\text{терм}}^{\text{н}}$  – (начальная) температура термопары;

$T_{\text{распл}}^{\text{н}}$  – (начальная) температура расплава;

$b$  – коэффициент пропорциональности

$\tau$  – время охлаждения

$\vartheta = c\rho\alpha/\alpha S$  – постоянная тепловой инерции

$P$  – плотность

$\omega$  – объем спая термопары

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи

$S$  – площадь поверхности спая термопары

Оценку ошибки в показаниях термопары можно оценить с помощью этой формулы, если допустить линейную аппроксимацию зависимости изменения температуры расплава от времени в интересующем интервале температур  $T = b\tau + T_{\text{н}}$ . Постоянную тепловой инерции определяют экспериментально. Согласно [17], для хромель-алюмелевой термопары с диаметром термоэлектродов 40 мкм, постоянная тепловой инерции оказалась равной  $3,7 \cdot 10^{-4}$  с. При скоростях охлаждения, соответствующих гранулированию в воду ( $10^3$  град/с) разница между температурой среды и показаниями термопары не будет превышать  $0,3^{\circ}\text{C}$  в интервале температур  $900 - 600^{\circ}\text{C}$ . Даже если увеличить постоянную тепловой инерции термопары на порядок, то разница составит не более  $3,5^{\circ}\text{C}$ , что никак не повлияет на оценку порядка скорости охлаждения гранул.

*Оценка влияния скорости охлаждения на величину переохлаждения расплава.*

Значительные переохлаждения достигаются тремя путями: очисткой расплава от примесей; кристаллизацией в малых объемах; применением больших скоростей охлаждения.

Известны многочисленные факты глубоких переохлаждений металлических расплавов в зависимости от степени чистоты и объема отливок при их медленном охлаждении [18]. Эти результаты часто используются для иллюстрации роли примесей при гетерогенном зарождении.

Скорость охлаждения отливки также влияет на переохлаждение расплава. Так, для сплавов Al-Mn (6,8% по массе), Al-Mg (12% по массе), Al-Cu (15% по массе) зафиксированы переохлаждения  $50$  и  $350^{\circ}\text{C}$  при  $V_{\text{охл}}$   $10^4$  и  $10^6$  град/с соответственно [17]. Причем достигнутые степени переохлаждения лежат ниже равновесного солидуса.

Влияние скорости охлаждения на величину переохлаждения всем исследователями связывается с понижением диффузионной подвижности атомов в переохлажденном расплаве [17,8,18,19,9,10,20,2]. Механизм влияния скорости охлаждения на величину переохлаждения связан прежде всего с процессами теплопереноса и массопереноса в расплавах, а также с процессами гомогенного и гетерогенного зарождения.

Процессы кристаллизации сплавов контролируются законами массопереноса в

сплаве. Интенсивность массопереноса определяется как градиентами температуры и концентрации, так и кинетическими параметрами системы (коэффициентами диффузии, самодиффузии, а также коэффициентом вязкости). Коэффициенты диффузии и самодиффузии, характеризуют скорость взаимного «перемешивания» атомов в расплаве, и их зависимость от температуры определяется следующим выражением [21]:

$$D = D_0 e^{-\frac{w}{kT}} \quad (5)$$

Где  $D$  – коэффициент диффузии;

$D_0$  – константа, зависимости от материала;

$W$  – энергия активации диффузии, зависящая от механизма диффузии;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура.

Эта формула непосредственно подтверждается экспериментально.

Согласно кинетической теории жидкостей Я.И. Френкеля вязкость жидкостей определяется по формуле [19]:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{w}{kT}} \quad (6)$$

Где  $\eta$  – вязкость;

$A$  – коэффициент, который можно считать приблизительно постоянной величиной;

$W$  – энергия активации диффузии в расплаве.

Как видно из (5) и (6) коэффициент диффузии и вязкости относятся к категории термически активируемых параметров, а экспоненциальный множитель в (5) и (6) формирует пороговый характер их зависимости от температуры.

Если массоперенос в расплавах осуществляется атомами компонентов, то перенос тепла в металлах и расплавах осуществляется главным образом за счет свободных электронов (электронной теплопроводности). Процессы массопереноса и теплопереноса резко отличаются характером температурной зависимости.

Температуропроводность (или иначе приведенный коэффициент теплопроводности [24]) кристаллов и расплавов составляет  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с, что в среднем на четыре-пять порядков превышает значения коэффициентов самодиффузии и диффузии атомов в кристаллическом ( $10^{-9} \dots 10^{-18}$  см<sup>2</sup>/с) [22,1] и жидком алюминии ( $10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с) [19]. Из этого следует,

что механизмы теплопроводности обеспечивают гораздо более высокие скорости передачи тепла и сброса температуры, чем максимально возможные скорости кристаллизации, контролируемые механизмами массопереноса. Поэтому в условиях больших скоростей охлаждения, расплав может охлаждаться гораздо быстрее, чем срабатывать механизм гомогенного или гетерогенного зарождения кристаллов, что приводит к их глубокому переохлаждению и значительному отклонению от равновесного состояния. В зависимости от степени переохлаждения расплава возможны его стабильная, неравновесная, метастабильная либо бездиффузионная кристаллизация, а также амортизация расплава. Это обстоятельство позволяет варьировать структурой и фазовым составом сплава в очень широких пределах в зависимости от скорости охлаждения при его кристаллизации.

Влияние скорости охлаждения на величину переохлаждения хорошо иллюстрируется с помощью С-образных диаграмм кристаллизации. Согласно этим диаграммам, при любой степени переохлаждения существует отрезок времени, в течение которого не происходит зарождения кристаллов, так называемый инкубационный период. Зависимость инкубационного периода от степени переохлаждения имеет нелинейный вид с экстремумом и эта зависимость используют при расчете критических скоростей охлаждения для получения аморфного состояния [8,23,24]. Подобные диаграммы, с помощью высоких скоростей охлаждения малых объемов, построены для силуминов с различным содержанием кремния в работах [3]. Авторы этих диаграмм называют их изотермическими диаграммами кристаллизации. Эти данные свидетельствуют о склонности алюминий-кремниевых сплавов к переохлаждению при высоких скоростях теплоотвода.

### Выводы

Анализ экспериментальных и расчетных данных, полученный различными исследованиями показал, что скорости охлаждения гранул из алюминиевых сплавов, размер которых находится в диапазоне 0,5...2,0 мм (при охлаждении в водо-воздушной среде), составляет  $10^3 \dots 10^5$  град/с, и не превышают  $10^6$  град/с.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Салли И.В. Физические основы формирования структуры сплавов. -М.: Металлургиздат, 1963. -220с.
2. Добаткин В.И., Елагин В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. -М.: Металлургия, 1981. -128с.
3. Мазур В.И., Рябова Н.С. Изучение метастабильных фаз в сплаве Al-7Si // Наукові праці Міжнар. Конф. "Евтектика IV". Дніпропетровськ, Україна. -1997. -С. 45-46.
4. Добаткин В.И. Роль кинетических и термодинамических факторов при кристаллизации гранул // Тезисы докладов I всесоюзная конф. «Металлургия гранул-83». -М., -1983. С.10-13.
5. Металлургия гранул: Сб. Статей / Миткин Б.С. Новые возможности процессов высокоскоростного затвердевания расплава в формировании свойств материалов. -вып.4. -ВИЛС, 1988. -С.68-76.
6. Металлургия гранул: Сб. Статей / Митин В.П., Шмаков Ю.В. Особенности создания оборудования для производства и первичной обработки гранул из алюминиевых сплавов. -вып.4. -ВИЛС, 1988.-С.88-94.
7. Гопащенко В.Г., Калужский Н.А., Ниперова Л.Ф. Производство и потребление порошковой продукции из алюминия и его сплавов в капиталистических и развивающихся странах // Цветметинформация, -М., 1985, С.56-59.

8. Быстрозакалённые металлы: Сборник научных трудов / под ред. Б.Кантора, -М.: Металлургия, 1983. -472с.
9. СудзукиК., Худзиморо Х., Хасимото К. Аморфные металлы. -М.: Металлургия, 1987. -328с.
10. Метастабильные и неравновесные сплавы / Ефимов Ю.В., Варлимонт Г., Мухин Г.Г. и др./ под ред. Ефимова Ю.В. -М.: Металлургия, 1988, -383с.
11. Фридляндер И.Н. Состояние и перспективы развития порошковых алюминиевых сплавов // Металлургия гранул-83: Тезисы докладов. I всесоюзная конференция по металлургии гранул. -М., 1983. -С.15-17.
12. Орлов В.К., Харламов В.М., Засецкий П.А. //Физика и химия обработки материалов. -1984, №6, -С.102-109.
13. Ефимова В.П. и др. К расчёту скорости охлаждения гранулированных сплавов. Изв.Вузов, Машиностроение, 1975, №6, С.104-108.
14. Орлов В.К., Старовойтенко Е.И., Мусиенко В.Т. Некоторые закономерности охлаждения частиц расплава в газовой среде и на металлической подложке // Металлургия гранул-83: Тезисы докладов. I всесоюзная конференция по металлургии гранул. -М., 1983. -С.155-157.
15. Малиновский Р. Р., Тарарышкин В.И. Особенности теплоотвода при кристаллизации гранулированных сплавов // Технология лёгких сплавов. 1969, №3, С.12-13.
16. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. -М.: Машгиз, 1957. -244с.
17. Мирошниченко И С. Закалка из жидкого состояния. -М.: Металлургия, 1982. -168с.
18. Чалмерс Б. Теория затвердевания. -М.: Металлургия, 1968. -288с.
19. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. -Л.: Наука, 1975. -592с.
20. Салли И. В. Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения, -К.: Наукова думка, 1972. -136с.
21. Шьюмон П. Диффузия в твёрдых телах. -М.: Металлургия, 1966. -196с.
22. Современная кристаллография под ред. Б. К. Вайнштейна: В 3т. / -М., Наука, 1980. -Т3. -480с.
23. Robert C. Ruhl Cooling Rates in Splat Cooling // Mater. Sci. Engng, -1967. Vol.1, N6. -P. 313-316.
24. Современная кристаллография под ред. Б. К. Вайнштейна: В 3т. / -М., Наука, 1979.Т.2. -360с.

#### REFERENCES

1. Salli I.V. Fizicheskie osnovy formirovaniya struktury splavov. -М.: Metallurgizdat, 1963. -220s.
2. Dobatkin V.I., Elagin V.I. Granuliruemye alyuminievye splavy. -М.: Metallurgiya, 1981. -128s.
3. Mazur V.I., Ryabova N.S. Izuchenie metastabil'nyh faz v splave Al-7Si // Naukovi praci Mizhnar. Konf. "Evtektika IV". Dnipropetrovs'k, Ukraïna. -1997. -S. 45-46.
4. Dobatkin V.I. Rol' kineticheskikh i termodinamicheskikh faktorov pri kristallizacii granul // Tezisydokladov I vesoyuznaya konf. «Metallurgiya granul-83». -М., -1983. S.10-13.
5. Metallurgiya granul: Sb. Statej / Mitin B.S. Novye vozmozhnosti processov vysokoskorostnogo zatverdevaniya rasplava v formirovanii svoystv materialov.-vyp.4. -VILS, 1988. -S.68-76.
6. Metallurgiya granul: Sb. Statej / Mitin V.P., SHmakov YU.V. Osobennosti sozdaniya oborudovaniya dlya proizvodstva i pervichnoj obrabotki granul iz alyuminievyyh splavov. -vyp.4. -VILS, 1988. -S.88-94.
7. Gopienko V.G., Kaluzhskij N.A., Niperova L.F. Proizvodstvo i potreblenie poroshkovoj produkcii iz alyuminiya i ego splavov v kapitalisticheskikh i razvivayushchihnya stranah // Cvetmetinformaciya, -М., 1985, S.56-59.
8. Bystrozakalyonnye metally: Sbornik nauchnyh trudov / pod red. B.Kantora, -М.: Metallurgiya, 1983. -472s.
9. SudzukiK., Hudzimoro H., Hasimoto K. Amorfnye metally. -М.: Metallurgiya, 1987. -328s.
10. Metastabil'nye i neravnovesnye splavy / Efimov YU.V., Varlimont G., Muhin G.G. i dr./ pod red. Efimova YU.V. -М.: Metallurgiya, 1988, -383s.
11. Fridlyander I.N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya poroshkovyyh alyuminievyyh splavov // Metallurgiya granul-83: Tezisy dokladov. I vesoyuznaya konferenciya po metallurgii granul. -М., 1983. -S.15-17.
12. Orlov V.K., Harlamov V.M., Zaseckij P.A. //Fizika i himiya obrabotki materialov. -1984, №6, -S.102-109.
13. Efimova V.P. i dr. K raschyotu skorosti ohlazhdeniya granulirovannyh splavov. Izv. Vuzov, Mashinostroenie, 1975, №6, S.104-108.
14. Orlov V.K., Starovojtenko E.I., Musienko V.T. Nekotorye zakonomernosti ohlazhdeniya chastic rasplava v gazovoj srede i na metallicheskoj podlozhke // Metallurgiya granul-83: Tezisy dokladov. I vesoyuznaya konferenciya po metallurgiii granul. -М., 1983. -S.155-157.
15. Malinovskij R. R., Tararyshkin V.I. Osobennosti teplootvoda pri kristallizacii granulirovannyh splavov // Tekhnologiya lyogkikh splavov. 1969, №3, S.12-13.
16. Kondrat'ev G. M. Teplovye izmereniya. -М.: Mashgiz, 1957. -244s.
17. Miroshnichenko I S. Zakalka iz zhidkogo sostoyaniya. -М.: Metallurgiya, 1982. -168s.
18. CHalmers B. Teoriya zatverdevaniya. -М.: Metallurgiya, 1968. -288s.
19. Frenkel' YA. I. Kineticheskaya teoriya zhidkostej. -L.: Nauka, 1975. -592s.
20. Salli I. V. Kristallizaciya pri sverhbol'shih skorostyah ohlazhdeniya, -К.: Naukova dumka, 1972. -136s.
21. S.H'yumon P. Diffuziya v tvyordyyh telah. -М.: Metallurgiya, 1966. -196s.
22. Sovremennaya kristallografiya pod red. B. K. Vajnshtejna: V 3t. / -М., Nauka, 1980. -Т3. -480s.
23. Robert C. Ruhl Cooling Rates in Splat Cooling // Mater. Sci. Engng, -1967. Vol.1, N6. -P. 313-316.
24. Sovremennaya kristallografiya pod red. B. K. Vajnshtejna: V 3t. / -М., Nauka, 1979.Т.2. -360s.

*Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиным (Украина)*