



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-16-24>

Научная статья  
Research article



## Особенности процесса затвердевания гранул при газоструйном распылении расплава бериллия

Б. В. Сырнев<sup>✉</sup>, Г. С. Пестова, О. В. Семилуцкая, Ф. С. Туганбаев

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева  
Казахстан, 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Д. Серикбаева, 19

✉ [izusan@mail.ru](mailto:izusan@mail.ru)

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментально-аналитических исследований процесса газоструйного диспергирования расплава и получения бериллиевых гранул. Показано влияние природы (азот, гелий), скорости подачи охлаждающего газа (300–650 м/с), температуры расплава и размера образующихся капель (<500 мкм) на скорость охлаждения и свойства гранул. Установлено, что в зависимости от регламента распыления затвердевание бериллиевых гранул может происходить по двум механизмам: кристаллизация, аморфизация (стеклование). При распылении азотом расплава бериллия гранулы диаметром менее 100 мкм затвердевают по механизму стеклования (аморфизируются), а диаметром более 300 мкм – по механизму кристаллизации. При этом определенная фракция гранул (размером от 100 до 300 мкм) затвердевает по смешанному механизму – поверхность аморфизируется, а центральная часть кристаллизуется, в результате чего происходит отслаивание «скорлупы» по поверхности перехода от механизма стеклования к механизму кристаллизации. Толщина «скорлупы» зависит от диаметра гранулы и составляет 10–15 мкм (на гранулах 300 мкм) и 20–25 мкм (на гранулах 100 мкм). Полученные результаты исследований хорошо согласуются с гипотезой о стеклокристаллическом механизме затвердевания гранул бериллия, обуславливающим расслоение их по межфазной границе. Такое затвердевание, по смешанному механизму, приводит к образованию легко отслаиваемой «корочки» на грануле, которая наиболее загрязнена примесями. Понимание изученного эффекта создает перспективы для его практического применения при получении специальных материалов из бериллия. Возможность отделения «корочки» от «ядрышка» создает условия для получения особых сортов спеченного бериллия для использования в атомных реакторах и производстве фольги, где необходима микроструктура бериллия с «чистыми» границами.

**Ключевые слова:** бериллий, гранулы, газоструйное распыление, скорость охлаждения, кристаллизация, аморфизация, температура, теплообмен, теплопроводность

**Для цитирования:** Сырнев Б.В., Пестова Г.С., Семилуцкая О.В., Туганбаев Ф.С. Особенности процесса затвердевания гранул при газоструйном распылении расплава бериллия. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2023;17(4):16–24. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-16-24>

## Characteristics of granule solidification in gas atomization of molten beryllium

B. V. Syrnev<sup>✉</sup>, G. S. Pestova, O. V. Semilutskaya, F. S. Tuganbaev

Serikbaev East Kazakhstan Technical University (EKTU)  
19 D. Serikbaev Str., Ust-Kamenogorsk 070004, Kazakhstan

✉ [izusan@mail.ru](mailto:izusan@mail.ru)

**Abstract.** Experimental and analytical studies on gas atomization of the molten beryllium and the production of beryllium granules are presented. The impact of various factors, including the choice of gas (nitrogen or helium), the cooling gas flow rate (ranging from 300 to 650 m/s), melt temperature, and droplet size (<500 μm), on the cooling rate and granule properties, is demonstrated. It has been determined that the solidification of beryllium granules can occur through two distinct mechanisms depending on the atomization process. These mechanisms include crystallization and amorphization (glass transition). When beryllium melt is atomized with

nitrogen, granules with diameters less than 100  $\mu\text{m}$  solidify via the amorphization mechanism (glass transition), while those with diameters exceeding 300  $\mu\text{m}$  solidify through crystallization. In such cases, a portion of granules with sizes ranging from 100 to 300  $\mu\text{m}$  undergoes a mixed mechanism solidification. In this process, the surface becomes amorphous, while the central part crystallizes, resulting in the formation of a “shell” on the surface, marking the transition from the glass transition mechanism to the crystallization mechanism. The thickness of this “shell” depends on the granule diameter, measuring 10–15  $\mu\text{m}$  for 300  $\mu\text{m}$  granules and 20–25  $\mu\text{m}$  for 100  $\mu\text{m}$  granules. The findings from this research align well with the hypothesis of a glass-crystalline mechanism of beryllium granule solidification, which leads to their separation at the interfacial boundary. Such solidification through a mixed mechanism results in the creation of a removable “crust” on the granule, which is typically more contaminated with impurities. Understanding this effect opens up possibilities for practical applications in the production of specialized materials from beryllium. The ability to separate the “crust” from the “core” provides the conditions for obtaining specialized sintered beryllium grades suitable for use in nuclear reactors and foil production, where a beryllium microstructure with “clean” boundaries is essential.

**Keywords:** beryllium, granules, gas atomization, cooling rate, crystallization, amorphization, temperature, heat transfer, thermal conductivity

**For citation:** Syrynev B.V., Pestova G.S., Semilutskaya O.V., Tuganbaev F.S. Characteristics of granule solidification in gas atomization of molten beryllium. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(4):16–24.

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-16-24>

## Введение

Бериллиевая промышленность использует различные методы получения порошков бериллия. Наиболее широко применяются механические способы измельчения слитков технического бериллия, чешуек электрорафинированного и крупки дистиллированного бериллия до дисперсности менее 56 мкм. Механическое измельчение сопровождается разогревом и поверхностным окислением порошков. Оксид бериллия, находясь на поверхности частиц порошка, наследуется границами зерен компактного спеченного бериллия, выполняя роль дисперсно-упрочняющей фазы [1–6]. Указанная фаза существенно влияет на процессы структурообразования и формирование прочностных и пластических свойств спеченного бериллия.

В работах [7–9] обоснованы новые представления о механизме деградации оксидной пленки, покрывающей частицу бериллия, в процессе горячей консолидации порошков. Было показано, что первоначально аморфная пленка оксида бериллия при температуре более 700 °С кристаллизуется, причем, в зависимости от присутствия легкоплавких примесей, механизм кристаллизации может быть гомогенным или гетерогенным. Это, в свою очередь, определяет наноструктуру образующихся дискретных оксидных частиц и, соответственно, упрочняющий эффект спеченного бериллия. Полученные количественные закономерности дополняют научные основы управления механическими свойствами спеченного бериллия, что особенно важно для управления качеством «приборных» сортов бериллия [10–16].

Однако есть другие важные области применения бериллия, где присутствие оксида бериллия и других примесей на границах зерен (соответственно на поверхности частиц исходных порошков) бериллия нежелательно. Это реакторные (отражатели нейтронов в атомных реакторах) и фольговые сорта берил-

лия. В первом случае примеси на границах ухудшают релаксацию возникающих при работе реактора термических напряжений, что может привести к растрескиванию деталей, а во втором – присутствие оксида на границах зерен снижает показатели герметичности (вакуумплотности) тонких фольг, что недопустимо при использовании в рентгеновской технике.

Известны работы по применению дистиллированного крупнозернистого бериллия в качестве реакторного сорта [3; 6; 17] и мелкозернистого бериллия, полученного по гидридной технологии, в качестве фольгового сорта [18]. Однако использование указанных технологий имеет ограниченный характер.

В 70-х годах прошлого столетия активно стала развиваться гранульная металлургия бериллия. Были разработаны и созданы уникальные установки диспергирования расплавов применительно к бериллию: установки ротационного диспергирования (ВИАМ, Россия), центробежного распыления (Лейболд-Хереус, Германия) и газоструйного распыления «Сфера» (ХФТИ, Украина). Однако экспериментальные работы показали, что загрязнение поверхности гранул примесями в результате взаимодействия с газовой атмосферой хоть и уменьшилось, но сохранилось.

В процессе практического использования метода газоструйного распыления расплава бериллия было установлено, что после затвердевания капель расплава гранулы определенных размеров имеют «скорлупу», состоящую из бериллия, обогащенного кислородом, азотом, железом (рис. 1).

Представлялось важным выяснение причин и механизма образования «скорлупы» с целью применения этого эффекта для управления качеством гранул и компактного спеченного бериллия. Заслуживала внимание проверка гипотезы о том, что формирование и отслаивание «скорлупы» объясняются скачкообразным изменением объемной усадки при затвердевании гранулы в результате перехода от механизма стеклования к механизму кристал-

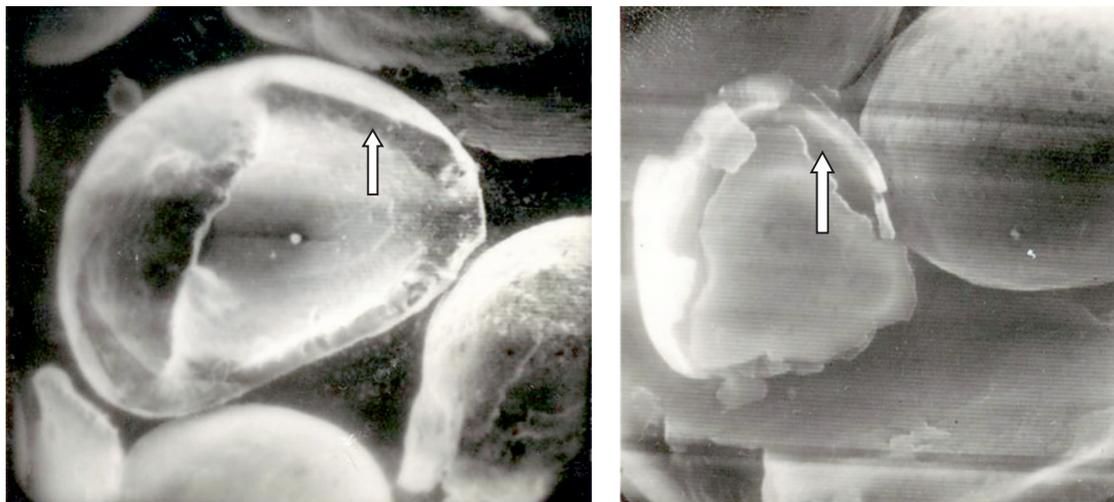


Рис. 1. Микрофотографии гранул, снятые на растровом электронном микроскопе ( $\times 200$ )  
Стрелками показана «скорлупа»

Fig. 1. Microimages of granules captured by a scanning electron microscope ( $\times 200$ )  
The “shell” is highlighted by arrows

лизации, что связано с уменьшением скорости охлаждения при передвижении фронта затвердевания от поверхности гранулы к центру. При кристаллизации расплава происходит увеличение плотности гранулы с  $1,69$  до  $1,85$  г/см<sup>3</sup>, что обуславливает сокращение объема гранулы на  $8,6$  % [2]. При затвердевании по механизму стеклования (аморфизации) сокращение объема гранулы значительно меньше (рис. 2).

Сведения о возможности получения бериллиевых металлических стекол в литературе ограничены, при этом отмечается, что стеклование гранул из чистых металлов облегчается при насыщении металла газами [19; 20]. Насыщению может способствовать распыление газами (в частности, применяемым при

распылении бериллия азотом), имеющими дозвуковую ( $300$  м/с) и сверхзвуковую ( $650$  м/с) скорости. Представляли интерес экспериментально-аналитические исследования динамики изменения скорости охлаждения бериллиевых гранул по мере перемещения фронта затвердевания от поверхности к центру для определения условий реализации смешанного «стеклокристаллического» механизма затвердевания гранул.

Цель работы состояла в проведении исследований применительно к методу газоструйного распыления расплава бериллия для поиска технологических регламентов получения гранул, структура которых позволяла бы при дальнейшей обработке эффективно очищать их поверхность от примесей.

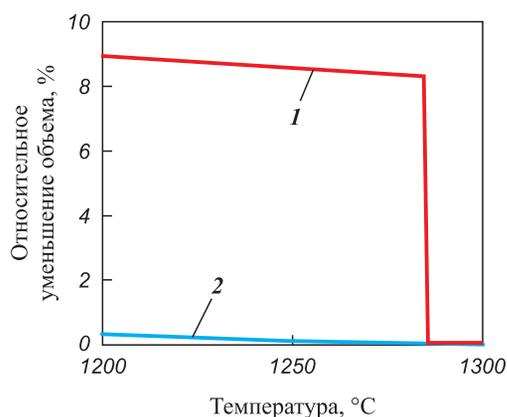


Рис. 2. Гипотетическая кривая объемной усадки при затвердевании расплава по механизмам кристаллизации (1) и стеклования (аморфизации) (2)

Fig. 2. Hypothetical curve of volumetric shrinkage during melt solidification by crystallization (1) and glass transition (amorphization) (2)

## Методика работы и результаты исследований

Численные исследования процесса затвердевания каплей расплава бериллия проводились двумя методами: графоаналитическим с использованием универсальных безразмерных графиков [21] и аналитическим с решением дифференциальных уравнений теплопроводности [22]. В первом случае рассматривалась задача нестационарной теплопроводности при послойном затвердевании охлаждаемого шара в результате равномерного конвективного отвода тепла от поверхности (рис. 3).

В расчетах не учитывались изменения объема капли при охлаждении и влияние на процесс охлаждения уже отвердевшего слоя капли. Температура газовой среды принималась  $40$  °С. В начальный момент времени ( $\tau = 0$ ) все точки капли с радиусом  $R_{ш}$  имеют одинаковую температуру расплава  $T_p = 1350$  °С.

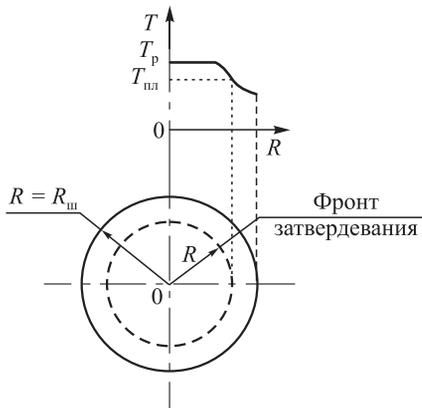


Рис. 3. Схема затвердевания гранулы  
 $T_{пл}$ ,  $T_p$  – температуры плавления и расплава бериллия соответственно;  $R_{ш}$  – радиус гранулы

Fig. 3. Schematic representation of granule solidification  
 $T_{m.p.}$ ,  $T_m$  – melting point and beryllium melt temperature, respectively;  
 $R_g$  – granule radius

При заданных условиях температура для любой точки капли будет функцией только времени и радиуса. Численные исследования выполнены для капель бериллия диаметром от 50 до 400 мкм при охлаждении азотом, гелием и воздухом с дозвуковой (300 м/с) и сверхзвуковой (650 м/с) скоростями.

Режим теплообмена капли (гранулы) с потоком охладителя определяется критерием Рейнольдса (Re) (рис. 4):

$$Re = \frac{V_g d}{\nu_g}$$

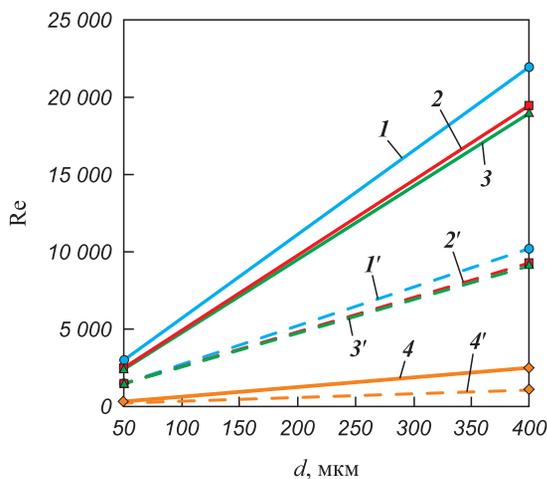


Рис. 4. Критерий Рейнольдса для газового потока в зависимости от диаметра гранул, вида газа и скорости дутья  
 1, 1' – аргон; 2, 2' – воздух; 3, 3' – азот; 4, 4' – гелий  
 $V_g = 650$  м/с (1–4) и 300 м/с (1'–4')

Fig. 4. Reynolds criterion for gas flow as a function of granule diameter, gas type, and gas flow rate  
 1, 1' – argon; 2, 2' – air; 3, 3' – nitrogen; 4, 4' – helium  
 $V_g = 650$  m/s (1–4) and 300 m/s (1'–4')

где  $V_g$  – скорость газового потока,  $d$  – диаметр капли,  $\nu_g$  – кинематическая вязкость потока.

При теплообмене сферического тела с газовым потоком критерий Нуссельта (Nu) для ламинарного и турбулентного режимов составляет

$$Nu = 2 + 0,69 Re^{0,5} Pr^{0,33} = \frac{\alpha d}{\lambda_r}$$

где Pr – критерий Прандтля, равный 0,67 для одноатомных газов и 0,72 для двухатомных;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности газа-энергоносителя, Вт/(м·К).

Критерий Био (Bi) выражает меру соотношения интенсивности теплоотдачи и интенсивности теплопроводности в грануле (рис. 5):

$$Bi = \frac{\alpha d}{\lambda_T}$$

где  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности расплава, Вт/(м·К).

Удельное количество теплоты, которое отдается гранулой за время до момента отвердевания, определяется как

$$q_{кр} = c_p (T_p - T_{пл}),$$

где  $c_p$  и  $T_p$  – соответственно удельная теплоемкость и температура расплава;  $T_{пл}$  – температура плавления бериллия (1285 °С).

Время и скорость охлаждения для различных условий охлаждения определялись с помощью без-

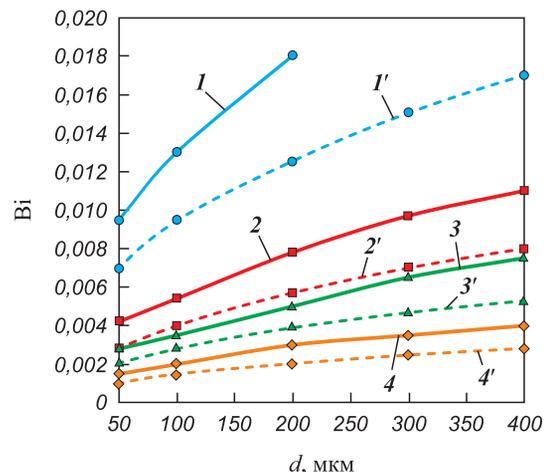


Рис. 5. Критерий Био для газового потока в зависимости от диаметра гранул, вида газа и скорости дутья  
 1, 1' – гелий; 2, 2' – азот; 3, 3' – аргон; 4, 4' – воздух  
 $V_g = 650$  м/с (1–4) и 300 м/с (1'–4')

Fig. 5. Biot number for gas flow as a function of granule diameter, gas type, and gas flow rate  
 1, 1' – helium; 2, 2' – nitrogen; 3, 3' – argon; 4, 4' – air  
 $V_g = 650$  m/s (1–4) and 300 m/s (1'–4')

размерных графиков [14], представляющих собой численные решения системы уравнений:

$$Y \frac{\partial \theta^*}{\partial \tau^*} = \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial r^{*2}} + 2 \frac{\partial \theta^*}{r^* \partial r^*} \quad (\text{при } R^* < r^* < 1),$$

$$-\frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} = \frac{\theta^*}{\beta} \quad (\text{при } r^* = 1),$$

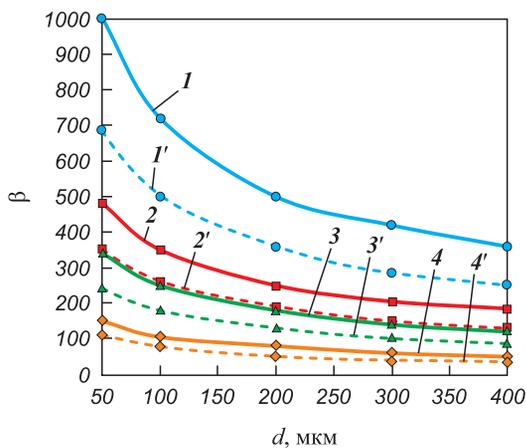
$$\frac{dR^*}{d\tau^*} = \frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} \quad (\text{при } r^* = R^*),$$

где  $Y = \frac{c_T(T_{пл} - \theta)}{q_{кр}}$  – относительное теплосодержание твердой фазы;  $c_T$  – удельная теплоемкость гранулы;  $\theta$  – температура гранулы;  $\theta^* = \frac{\theta - 1}{T_{пл} - t}$  – безразмерная температура;  $t$  – температура газа;  $\tau^* = \frac{\tau \lambda_T (T_{пл} - t)}{R_{ш}^2 \rho_T q_{кр}}$  – безразмерное время;  $r^* = \frac{r}{R_{ш}}$ ,  $R^* = \frac{R}{R_{ш}}$  – относительные радиусы: текущий и фронта затвердевания;  $\beta = 1/Bi$  – коэффициент (рис. 6);  $r$  – «текущий» радиус, изменяющийся от 0 до  $R_{ш}$ .

Время охлаждения рассчитывалось по формуле

$$\tau = \frac{\tau^* \rho_T q_{кр} R_{ш}^2}{\lambda_T (T_p - T_T)},$$

где  $\tau^*$  – относительное время, определяемое по графикам [14];  $\rho_T$  – плотность расплава;  $R_{ш}$  – радиус гра-



**Рис. 6.** Коэффициент  $\beta = 1/Bi$  для газового потока в зависимости от диаметра гранул, вида газа и скорости дутья  
 $I, I'$  – воздух;  $2, 2'$  – аргон;  $3, 3'$  – азот;  $4, 4'$  – гелий  
 $V_g = 650$  м/с ( $I-4$ ) и  $300$  м/с ( $I'-4'$ )

**Fig. 6.**  $\beta = 1/Bi$  as a function of granule diameter, gas type, and gas flow rate  
 $I, I'$  – air;  $2, 2'$  – argon;  $3, 3'$  – nitrogen;  $4, 4'$  – helium  
 $V_g = 650$  m/s ( $I-4$ ) and  $300$  m/s ( $I'-4'$ )

нулы;  $T_T$  – температура диспергирующего газа.

Скорость охлаждения рассчитывалась следующим образом:

$$V_{охл} = \frac{T_p - T_{пл}}{\tau}.$$

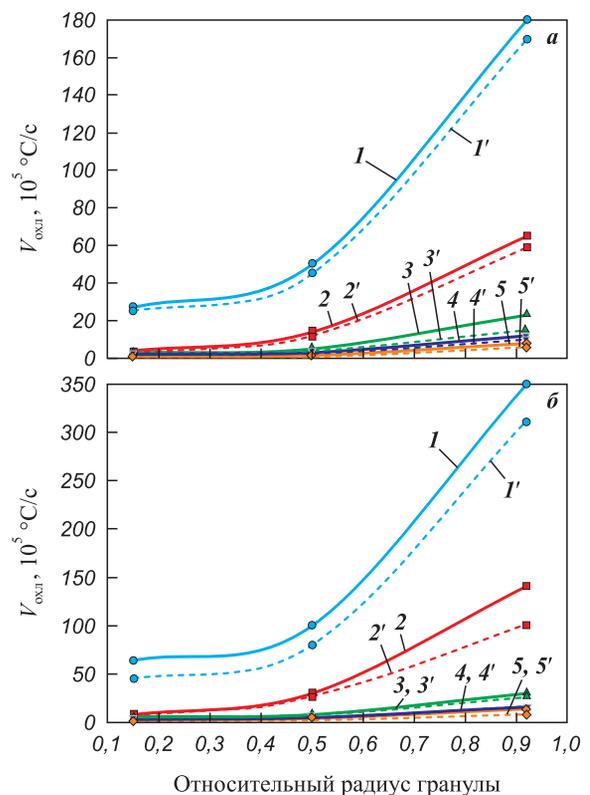
Результаты численных исследований графоаналитическим методом представлены на рис. 7.

Для оценки корректности полученных данных по первому методу были проведены численные исследования вторым методом – решением дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2\partial \theta}{r \partial r} \right).$$

Граничные условия:

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_{r=R_{ш}} = - \left( \frac{\alpha}{\lambda} \theta \right)_{r=R_{ш}} \quad \text{– на поверхности капли;}$$



**Рис. 7.** Скорость охлаждения гранул в азоте (а) и гелии (б), рассчитанная графоаналитическим методом, в зависимости от размера гранул и скорости газового потока  
 $d, \mu\text{м} = 50$  ( $I, I'$ ),  $100$  ( $2, 2'$ ),  $200$  ( $3, 3'$ ),  $300$  ( $4, 4'$ ),  $400$  ( $5, 5'$ )  
 $V_g, \text{м/с} = 650$  ( $I-5$ ),  $300$  ( $I'-5'$ )

**Fig. 7.** Cooling rate of granules in nitrogen (а) and helium (б), determined through graphical analysis, as a function of granule size and gas flow rate  
 $d, \mu\text{m} = 50$  ( $I, I'$ ),  $100$  ( $2, 2'$ ),  $200$  ( $3, 3'$ ),  $300$  ( $4, 4'$ ),  $400$  ( $5, 5'$ )  
 $V_g, \text{m/s} = 650$  ( $I-5$ ),  $300$  ( $I'-5'$ )

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 - \text{в центре капли.}$$

Начальные условия (при  $\tau = 0$ ):  $\theta = T_p - T_{пл}$  для  $0 < r < R_{ш}$ .

Решение дифференциального уравнения получено в работе [5] в виде

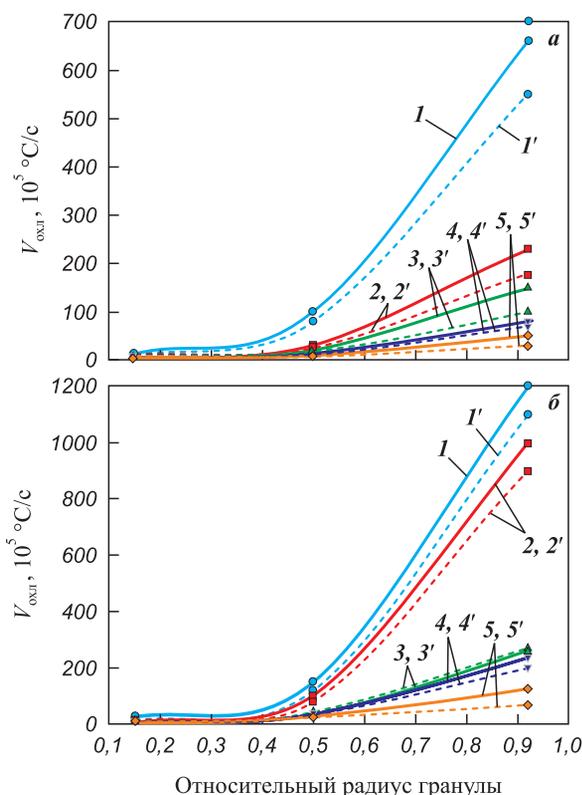
$$\theta = \frac{T_p - T_{пл}}{T_p - T_r} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_0),$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $F_0$  – число Фурье;  $B_n$  – коэффициенты, определяемые из соотношения

$$B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)};$$

$\mu_n$  – корни характеристического уравнения

$$\operatorname{tg}\mu = -\frac{\mu}{Bi - 1}.$$



**Рис. 8.** Скорость охлаждения гранул в азоте (а) и гелии (б), рассчитанная аналитическим методом, в зависимости от размера гранул и скорости газового потока  $d$ , мкм = 50 (1, 1'), 100 (2, 2'), 200 (3, 3'), 300 (4, 4'), 400 (5, 5')  $V_r$ , м/с = 650 (1–5), 300 (1'–5')

**Fig. 8.** Cooling rate of granules in nitrogen (а) and helium (б), analytically calculated as a function of granule size and gas flow rate  $d$ ,  $\mu\text{m} = 50$  (1, 1'), 100 (2, 2'), 200 (3, 3'), 300 (4, 4'), 400 (5, 5')  $V_g$ , m/s = 650 (1–5), 300 (1'–5')

Время отвердевания капли расплава равно  $\tau = \frac{F_0 c_p \rho_T r^2}{\lambda_T}$ , где  $r = (1 - R^*)R$ .

Результаты расчета скоростей затвердевания каплей бериллия по аналитическому методу представлены на рис. 8.

## Обсуждение результатов исследований

Анализ зависимостей, полученных двумя методами, показывает, что с увеличением диаметра гранулы с 50 до 400 мкм скорость затвердевания вблизи поверхности каплей снижается с величин порядка  $10^7$  до  $10^5$  °C/с, а с повышением теплопроводности газа – возрастает в 2–3 раза (см. рис. 7, 8). Данные по скоростям охлаждения каплей азотом и гелием, установленные двумя различными способами, при некоторых количественных различиях имеют достаточно хорошую сходимость.

Эксперименты по распылению бериллиевых гранул азотом показали, что гранулы размером 300 мкм имеют отслаивающуюся оболочку-«скорлупу» толщиной около 10 мкм ( $R^* = 0,92$ ). Если исходить из вышесформулированной гипотезы, то наложение указанных экспериментальных данных на график (см. рис. 7, а) позволяет определить скорость охлаждения, выше которой наблюдается затвердевание бериллия по механизму стеклования. Эта скорость составляет величину порядка  $10^6$  °C/с для азота, истекающего из форсунки со скоростями 300–650 м/с. Полученные значения скорости близки к значению скорости стеклования некоторых металлов [12; 13]. Обработкой графических данных (см. рис. 7, а) можно построить кривую зависимости толщины «скорлупы», покрывающей гранулы, от размера гранул и скорости подачи диспергирующего газа-энергосносителя (рис. 9).

Таким образом, полученные результаты экспериментально-аналитических исследований хорошо согласуются с гипотезой о «стеклокристаллическом» механизме затвердевания гранул бериллия, обуславливающим расслоение их по межфазной границе. При распылении расплава бериллия азотом гранулы размером менее 100 мкм затвердевают по механизму стеклования (аморфизируются), а диаметром более 300 мкм – по механизму кристаллизации. Гранулы величиной от 100 до 300 мкм имеют смешанный механизм затвердевания, в результате чего происходит отслаивание «скорлупы» по поверхности перехода от механизма стеклования к механизму кристаллизации. Толщина «скорлупы» зависит от диаметра гранулы и составляет 10–15 мкм ( $d = 300$  мкм) и 20–25 мкм ( $d = 100$  мкм). В процессе остывания мелкой фракции

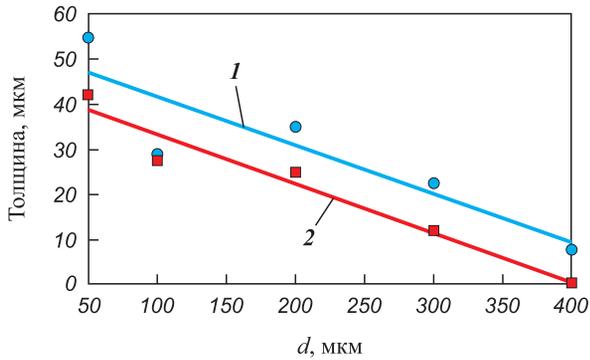


Рис. 9. Зависимость толщины поверхностной оболочки (скорлупы) от размера гранул бериллия и скорости подачи азота – газа-энергоносителя  
 $V_r = 650$  м/с (1) и 300 м/с (2)

Fig. 9. The thickness of the surface shell in relation to the size of beryllium granules and the flow rate of nitrogen (energy-carrying gas)  
 $V_g = 650$  m/s (1) and 300 m/s (2)

<100 мкм и «скорлупы» аморфная структура переходит в кристаллическую. Понимание изученного эффекта может иметь практическое значение.

Известно, что поверхность гранул бериллия (а также «скорлупа») при распылении азотом обогащена азотом и кислородом, что приводит к повышенному содержанию примесей на границах компактного бериллия,

полученного из этих гранул. Присутствие примесей на границах зерен ухудшает ряд важных физико-механических характеристик: высокотемпературную пластичность, способность к релаксации напряжений, вакуумплотность фольги и некоторые другие.

Для получения сорта бериллия с пониженным содержанием примесей по границам зерен и повышенными физико-механическими характеристиками следует на стадии классификации выделять фракцию сферических порошков со «скорлупой» +100–300 мкм с последующим отделением «скорлупы» (шелушением) без их измельчения известными методами, например на ударно-центробежной мельнице по определенным режимам. Полученные гранулы возможно использовать для последующей консолидации в заготовки для изготовления реакторных отражателей-замедлителей и прокатки фольг.

Обобщая полученные результаты с материалами, изложенными в ранних наших работах [7–9], и учитывая требования к различным сортам бериллия (высокий прецизионный предел упругости – для приборного сорта, низкая релаксационная стойкость и вакуумплотность – для реакторного и фольгового сортов), может быть предложена технологическая схема получения спеченных сортов бериллия различного назначения (рис. 10). После диспергирования расплава гранулы классифицируются на три фракции: –100 мкм (аморф-



Рис. 10. Технологическая схема получения различных конструктивных сортов спеченного бериллия

Fig. 10. Flowchart of production process for different structural grades of sintered beryllium

ные), +300 мкм (кристаллические) и +100–300 мкм (со скорлупой). Далее производится «шелушение» фракции +100–300 мкм, и из очищенных ядрышек методом горячего прессования получают фольгово-реакторный сорт. Остальные фракции (–100 мкм, +300 мкм и «скорлупа») после шелушения направляются на изготовление приборного сорта, содержащего повышенное количество оксида бериллия, играющего роль армирующей упрочняющей фазы.

## Выводы

1. Обоснован механизм образования поверхностной оболочки (скорлупы) гранул при газоструйном распылении расплава бериллия как результат «аморфно-кристаллического» затвердевания капель расплава.

2. Установлена зависимость толщины поверхностной оболочки (скорлупы) от скорости подачи диспергирующего газа и размера гранул.

3. Предложена технологическая схема переработки гранул для получения бериллия различного применения.

## Список литературы / References

- Webster D. The effect of low melting phases on the elevated temperature microstructural stability of hot pressed beryllium. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1975;6(4):803–808.
- Папилов И.И., Тихинский Г.Ф. Физическое металловедение бериллия. М.: Атомиздат, 1968. 451 с.
- Davydov D.A., Kholopova O.V., Kolbasov B.N. Inflammation and oxidation characteristics of beryllium: ITER final report. TA. No. ИТА-81-06 Be Dust Explosion, July 2005.
- Давыдов Д.А., Холопова О.В., Колбасов Б.Н. Образование и деградация оксидных пленок на бериллии. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез*. 2010;(2):39–48.  
Davydov D.A., Kholopova O.V., Kolbasov B.N. Formation and degradation of oxide films on beryllium. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Termoyadernyi sintez*. 2010;(2):39–48. (In Russ.).
- Николаенко А.А., Тузов Ю.В. Влияние зернограницных включений оксида на механические свойства горячепрессованного бериллия. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. 2012;(2):52–59.  
Nikolaenko A.A., Tuzov Yu.V. The effect of grain boundary oxide inclusions on the mechanical properties of hot-pressed beryllium. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyi sintez*. 2012;(2):52–59. (In Russ.).
- Taylor N., Baker D., Cattaglia S. Key issues in the safety and licensing of ITER. In: *IAEA, 3<sup>rd</sup> TM "First generation of fusion power plants: Design and technology"* (Vienna, Austria, 13–15 July 2009); 9<sup>th</sup> TM "Fusion power plant safety" (Vienna, Austria, 15–17 July 2009). CD-ROM proc., Thursday-2009-07-16.
- Ревуцкий А.В., Сырнев Б.В., Лопатин В.Ю., Семилуцкая О.В., Сегеда Т.А. Исследование формирования упрочняющей фазы на границах зерен спеченного бериллия. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020;(3):25–33.  
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-3-25-33>  
Revutskiy A.V., Syrnev B.V., Lopatin V.Yu., Semilutskaya O.V., Segeda T.A. Study of reinforcing phase formation at the grain boundaries of sintered beryllium. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62(1):125–131.  
<https://doi.org/10.3103/S1067821221010132>
- Revutskiy A.V., Syrnev B.V., Semilutskaya O.V. Study on hardening potential of isostatic pressed beryllium. *Key Engineering Materials*. 2020;842:199–204.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.842.199>
- Revutskiy A.V., Syrnev B.V., Semilutskaya O.V. Study of beryllium hardening obtained by powder metallurgy. *Vestnik Karagandinskogo Universiteta. Ser. Fizika*. 2021;2(102):40–49.  
<https://doi.org/10.31489/2021Ph2/40-49>
- Webster D., Crooks D.D. Creep mechanisms in beryllium. *Metallurgical and Materials Transactions*. 1976;(7A):1307–1315.
- Crawford R.F., Burns A.B. Strength efficiency and design data for beryllium structures ASD. *Technical Report 61.692 US AIR Force*. Ohio. 1962.
- Cai Y., Wu S., Xu R., Yu J. Pressure-induced phase transition and its atomistic mechanism in BeO: A theoretical calculation. *Physical Review Letters*. 2006;73(18):184104.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.184104>
- Sebahaddin A., Murat D. Pressure-induced phase transition of BeO. *Solid State Communications*. 2009;149(9–10):345–348.
- Weisz M., Mollen J., Voron J. Possibility of the appearance of a liquid phase at 430 °C in commercial beryllium. *Journal of Nuclear Materials*. 1963;(10):56–59.
- Turner G.I., Lane R.A. The effect of powder particle size on the mechanical properties of hot pressed P1 beryllium. In: *Beryllium: Proc. Conf. (London, October, 1977)*. P. 1–15.
- Webster D., Crooks D.D., Vidoz A.E. The effect of oxide dispersion on the recrystallization of beryllium. *Metallurgical and Materials Transactions*. 1974;4(12):2841–2847.
- Тузов Ю.В., Горохов В.А., Пахомов Я.Д., Пронин В.Н. Бериллий – материал ядерной и термоядерной техники. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. 2009;(2):124–127.  
Tuzov Yu.V., Gorokhov V.A., Pakhomov Ya.D., Pronin V.N. Beryllium – material of nuclear and thermonuclear technology. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyi sintez*. 2009;(2):124–127. (In Russ.).
- Маркушкин Ю.Е., Горлевский В.В., Забродин А.В., Тузов Ю.В. Бериллий для рентгеновской техники – новые возможности нанокристаллического материала. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*. 2012;(1):130–136.  
Markushkin Yu.E., Gorlevskiy V.V., Zabrodin A.V., Tuzov Yu.V. Beryllium for X-ray technology – new possibilities of nanocrystalline material. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy*. 2012;(1):130–136. (In Russ.).

19. Силаев А.Ф., Фишман В.Д. Диспергирование жидких металлов и сплавов. М.: Химия, 1983. 144 с.
20. Металлические стекла. Под ред. Дж.Дж. Гидмана и Х.Дж. Лими. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
21. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азот-содержащих удобрений. М.: Химия, 1980. 289 с.
22. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

### Сведения об авторах



**Борис Владимирович Сырнев** – д.т.н., вед. науч. сотрудник научного центра «Веритас» Восточно-Казахстанского технического университета (ВКТУ)

**ORCID:** 0000-0002-3085-3341

**E-mail:** izusan@mail.ru

**Галина Сергеевна Пестова** – к.т.н., вед. инженер-конструктор научного центра «Веритас», ВКТУ

**ORCID:** 0000-0001-6482-5106

**E-mail:** g\_pestova@inbox.ru

**Оксана Валерьевна Семилуцкая** – ст. преподаватель школы «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», ВКТУ

**ORCID:** 0000-0001-9494-9572

**E-mail:** 2009genius@mail.ru

**Фарит Сапаргалиевич Туганбаев** – вед. инженер-технолог научного центра «Веритас», ВКТУ

**ORCID:** 0000-0003-2241-555X

**E-mail:** 24aprel1946@mail.ru

### Information about the Authors

**Boris V. Syrnev** – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Scientific Center “Veritas” of the East Kazakhstan Technical University (EKTU)

**ORCID:** 0000-0002-3085-3341

**E-mail:** izusan@mail.ru

**Galina S. Pestova** – Cand. Sci. (Eng.), Leading Design Engineer of the Scientific Center “Veritas”, EKTU

**ORCID:** 0000-0001-6482-5106

**E-mail:** g\_pestova@inbox.ru

**Oksana V. Semilutskaya** – Senior Lecturer of the School “Metallurgy and mineral processing”, EKTU

**ORCID:** 0000-0001-9494-9572

**E-mail:** 2009genius@mail.ru

**Farit S. Tuganbaev** – Leading Process Engineer of the Scientific Center “Veritas”, EKTU

**ORCID:** 0000-0003-2241-555X

**E-mail:** 24aprel1946@mail.ru

### Вклад авторов



**Б. В. Сырнев** – научное руководство, постановка задач, участие в экспериментах, обработка результатов, обоснование технологической схемы, оформление статьи.

**Г. С. Пестова** – расчеты, численные исследования, обсуждение результатов.

**О. В. Семилуцкая** – обработка результатов, обсуждение результатов, написание раздела статьи.

**Ф. С. Туганбаев** – организация и проведение экспериментальных работ, обсуждение результатов, обоснование технологической схемы.

### Contribution of the Authors

**B. V. Syrnev** – scientific supervision, goal formulation, participation in experiments, data analysis, development of the technological layout, manuscript writing.

**G. S. Pestova** – calculations, numerical studies, and discussion of results.

**O. V. Semilutskaya** – data analysis, discussion of results, manuscript writing (section), development of the technological layout.

**F. S. Tuganbaev** – organization and execution of experimental work, discussion of results.

Статья поступила 13.10.2022 г.

Доработана 12.06.2023 г.

Принята к публикации 15.06.2023 г.

Received 13.10.2022

Revised 12.06.2023

Accepted 15.06.2023