



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.08

УДК 621.763

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНУЛ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL–ZN–MG–CU ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ

М.В. Жаров

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 10 июля 2021 г.  
Принята: 10 ноября 2021 г.  
Опубликована: 30 декабря 2021 г.

#### Ключевые слова:

гранулы, методы получения гранул, кристаллизация гранул алюминиевых сплавов, скорость кристаллизации расплава; охлаждающая среда, паровая прослойка, «паровая рубашка», скорость отвода тепла, диаметр гранул, размерный состав гранулята, прессование гранулированных материалов, прочностные характеристики гранулированных материалов.

### АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты исследований процесса получения гранулированных материалов из высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al – Zn – Mg – Cu центрифугированием расплава со сверхвысокими скоростями охлаждения гранул. Вводится понятие «паровой рубашки», а именно паровой прослойки, возникающей между телом гранулы и охлаждающей жидкостью, препятствующей интенсивности отвода тепла и являющейся препятствием увеличения скорости кристаллизации за счет меньшей теплопроводности паров воды. Установлено, что образование паровой прослойки происходит всегда ввиду нагрева слоев охлаждающей жидкости, контактирующих с каплей расплава до температур кипения и перехода охладителя из жидкой фазы в пар. Предлагается технология повышения скорости кристаллизации гранул за счет постоянного удаления паровой прослойки. Удаление (сбив) паровой оболочки, возникающей вокруг капли, происходит за счет высокой скорости движения капли в охлаждающей среде. Принципиально важным при промышленной реализации данной технологии является не столько конструкция устройства для получения гранул центрифугированием расплава, а высокая необходимая скорость вращения разбрызгивающего тигля рассматриваемого устройства. Приведены результаты полученных экспериментальных данных для определения необходимой скорости вращения перфорированного стакана, обеспечивающей создание достаточной первоначальной скорости движения капли, приводящей к постоянному «сбиву» образующейся «паровой рубашки». Определено, что повышение скоростей отвода тепла от кристаллизующихся гранул и, как результат, увеличение скорости кристаллизации приводят к повышению прочностных характеристик гранулированных алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu. В частности, при производстве прессованных полуфабрикатов из сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu, таких как В95, В96ц, увеличение прочностных характеристик материала прессованных изделий составляет до 15 % по сравнению с теми же гранулированными материалами, полученными традиционными методами с промышленными скоростями кристаллизации капель расплава. Установлено, что предлагаемый метод, основанный на удалении паровой прослойки вокруг образующейся гранулы, является единственным возможным для дальнейшего увеличения скорости охлаждения и, как следствие, скорости кристаллизации. Уменьшение размеров гранул до размеров порошинок приводит к серьезным технологическим проблемам при дальнейшей консолидации гранул и по сути является тупиковой ветвью дальнейшего развития методов гранулирования.

© ПНИПУ

© Жаров Максим Владимирович – к.т.н., доц., e-mail: MaximZharov@mail.ru, ID: 0000-0002-2962-0452.

Maxim V. Zharov – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: MaximZharov@mail.ru, ID: 0000-0002-2962-0452.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

# INVESTIGATION OF THE FEATURES OF CRYSTALLIZATION OF GRANULES OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOYS OF THE AL-ZN-MG-CU SYSTEM AT ULTRA-HIGH COOLING RATES

M.V. Zharov

Federal state budgetary educational institution of higher education «Moscow Aviation Institute»  
(National Research University). Moscow, Russian Federation

## ARTICLE INFO

Received: 10 July 2021  
Accepted: 10 November 2021  
Published: 30 December 2021

### Keywords:

granules, methods of obtaining granules, crystallization of aluminum alloy granules, melt crystallization rate; cooling medium, steam layer, «steam jacket», heat removal rate, granule diameter, granulate size composition, pressing of granular materials, strength characteristics of granular materials.

## ABSTRACT

The article presents the results of studies of the process of obtaining granular materials from high-strength aluminum alloys of the Al – Zn – Mg – Cu system by centrifugation of the melt with ultra-high cooling rates of granules. The concept of a «steam jacket» is introduced, namely, a steam layer that occurs between the granule body and the cooling liquid, which prevents the intensity of heat removal and is an obstacle to increasing the crystallization rate due to the lower thermal conductivity of water vapor. It is established that the formation of a vapor layer always occurs due to the heating of the cooling liquid in contact with the melt drop to boiling temperatures and the transition of the cooler from the liquid phase to steam. The technology of increasing the rate of crystallization of granules due to the constant removal of the vapor layer is proposed. The removal (knocking down) of the vapor shell that occurs around the drop occurs due to the high speed of the drop movement in the cooling medium. Fundamentally important in the industrial implementation of this technology is not so much the design of the device for obtaining pellets by centrifugation of the melt, namely, the high required rotation speed of the spraying crucible of the device under consideration. The results of experimental data are presented to determine the necessary rotation speed of the perforated cup, which ensures the creation of a sufficient initial velocity of the drop movement, leading to a constant churning of the «steam jacket». It is determined that an increase in the rates of heat removal from the crystallized granules and, as a result, an increase in the crystallization rate leads to an increase in the strength characteristics of granular aluminum alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system. In particular, in the production of pressed semi-finished products from alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system, such as B95, B96c. the increase in the strength characteristics of the material of the press products is up to 15 % compared to the same granular materials obtained by traditional methods with industrial crystallization rates of melt droplets. It is established that this method, based on the removal of the vapor layer around the formed granule, is the only possible one for further increasing the cooling rate and, as a result, the crystallization rate. Reducing the size of granules to the size of powders leads to serious technological problems in the further consolidation of granules and, in fact, is a dead end branch of the further development of granulation methods.

© PNRPU

## Введение

В последнее время конструкторами в машиностроении вообще и в авиастроении в частности всё в большей степени предъявляются требования к повышению механических характеристик сплавов, созданию новых типов сплавов с уникальными эксплуатационными характеристиками. На современном этапе развития металлургии технология дальнейшего повышения прочностных и других эксплуатационных свойств сплавов легированием, применительно к обычным условиям производства полуфабрикатов из слитков, практически исчерпала себя [1, 2].

В связи с этим особое внимание уделяется технологии изготовления изделий и полуфабрикатов из различных металлов и сплавов с применением технологии гранулирования. Металлургия гранул, основанная на использовании высоких скоростей кристаллизации расплава материала, довольно долгое время относилась к порошковой металлургии. В настоящее время металлургия гранул довольно отчетливо выделяется в отдельное направление [3]. Имеется ряд существенных отличий

металлургии гранул от порошковой металлургии. В частности, в порошковой металлургии элементарные металлические частицы (гранулы, чешуйки, порошок) получают любым способом, в том числе разбрызгиванием расплава, истиранием или дроблением слитка, часто используют в смесях частицы разнородных металлов и сплавов. В металлургии гранул элементарные частицы получают исключительно разбрызгиванием или распылением сплава определенного состава [1, 3].

Применительно к алюминиевым сплавам можно отметить, что перспективы применения технологии гранулирования основаны на использовании одного или нескольких факторов существенного изменения структуры материала при высоких скоростях кристаллизации расплава. К таким факторам можно отнести: аномальное пересыщение твердого раствора легирующими элементами, предотвращение образования или измельчение и изменение формы первичных кристаллов интерметаллических соединений, диспергирование продуктов эвтектической кристаллизации, предупреждение расслаивания расплава в системах с двумя несмешивающимися жидкостями [1].

При производстве изделий и полуфабрикатов из высокопрочных алюминиевых сплавов технология гранулирования позволяет решить вопросы, связанные с наличием внутренних кристаллизационных напряжений. Известно, что при литье высокопрочных алюминиевых сплавов имеются определенные ограничения слитков по их размерам. При превышении этих размеров слиток отлить невозможно из-за возникновения трещин [3]. Получение брикета из гранул для последующего спекания или деформирования возможно с любыми габаритными размерами.

Технологии с применением высоких скоростей кристаллизации обеспечивают получение значительного упрочняющего эффекта гранулированного материала от легирования алюминиевых сплавов тугоплавкими компонентами, не растворимыми в алюминии или имеющими очень малую растворимость (цирконий, хром, железо, марганец). Это позволяет создавать новые гранулированные алюминиевые сплавы повышенной прочности на основе традиционных систем Al–Zn–Mg–Cu, Al–Cu–Mg, Al–Mg с легированием тугоплавкими элементами в гораздо большем количестве, чем это применяется для существующих сплавов [1].

Таким образом, повышенная прочность алюминиевых сплавов, создаваемых с применением технологии гранулирования определяется сочетанием двух механизмов упрочнения:

- дисперсионного упрочнения, связанного с выделением дисперсных упрочняющих фаз, образуемых цинком, магнием, медью, кремнием, в результате закалки и старения готовых изделий или полуфабрикатов;

- дисперсионного твердения, связанного с образованием аномально пересыщенных твердых растворов переходных металлов в алюминии при кристаллизации гранул [3].

## 1. Теоретические исследования и постановка задачи

Одним из основных факторов, влияющих на формирование пересыщенных твердых растворов и формирование субмикроскопической структуры материала, является скорость кристаллизации, которая в свою очередь определяется скоростью отвода тепла от формируемой гранулы.

Вокруг гранулы, попадающей в охлаждающую среду, образуется «паровая рубашка», а именно тонкая прослойка пара, возникающего за счет перехода охлаждающей жидкости (как правило, технической воды), соприкасающейся с раскаленным или расплавленным металлом в парообразное состояние. Формируемая «паровая рубашка» является барьером по отношению к интенсивному отводу тепла от охлаждаемой гранулы. Низкая интенсивность теплопередачи в воздушной или газовой среде объясняется, в первую очередь, невысоким коэффициентом теплопередачи в воздухе.

Проведен анализ существующих методов получения гранул с точки зрения повышения интенсивности отвода

тепла от гранулируемого материала. Медленно движущаяся в охлаждающей среде (в технической воде) гранула, получаемая, к примеру, вибрационным или капельным методом литья, не может сбить постоянно возникающую вокруг нее паровую оболочку. Для преодоления появления постоянно образующейся прослойки пара скорость движения капли должна быть на порядок выше.

Известен способ получения гранул, заключающийся в диспергировании струи расплава под действием регулярных возмущений [4]. При реализации данного способа гранулирования при помощи системы продавливания расплава формируется ламинарная струя. Возбуждение струи и распад последней на капли одинакового размера производится системой возбуждения. Длину пролета гранул до охлаждающей среды устанавливают из соотношения

$$l > w \times (\tau_1 + \tau_2),$$

где  $w$  – скорость движения гранул, м/с;  $\tau_1$  – время кристаллизации гранулы, с;  $\tau_2$  – время охлаждения гранул до температуры  $0,5 \cdot T_k$ , с;  $T_k$  – температура кристаллизации гранул из заданного материала, °C.

Таким образом, кристаллизация гранулы и ее охлаждение до температуры  $0,5 \cdot T_k$  происходит исключительно в атмосфере инертных газов или воздушной атмосфере, насыщенной парами охлаждающей жидкости. Понятно, что скорость охлаждения гранул в воздушной или инертной атмосфере в разы меньше скорости кристаллизации в охлаждающей жидкости. Необходимость охлаждения капель расплава до температуры  $0,5 \cdot T_k$  объясняется тем фактом, что если температура гранул, попадающих в накопитель с охлаждающей жидкостью, находится в диапазоне  $T > 0,5 \cdot T_k$ , то между гранулами возникает диффузионное взаимодействие, и получить из образующихся конгломератов отдельные гранулы является довольно затруднительной задачей [4]. Очевидно, что скорости кристаллизации гранул при таком способе гранулирования еще меньше, чем в случае вибрационного и капельного методов с отверждением капли непосредственно в охлаждающей жидкости.

Получение скоростей движения гранул, обеспечивающих сбив постоянно возникающей паровой оболочки, возможно только при центробежном разбрызгивании расплава с высокой скоростью начального движения расплавленной капли. Известно устройство для центробежного разбрызгивания расплава, содержащее вращающийся лопастной диск с приводом, вращающийся сборник гранул с водой и металлоприемник для подачи струи расплава в зону разбрызгивания. Как показали исследования, за счет того, что лопастной диск расположен над уровнем воды, образующиеся капли расплава частично охлаждались в воздушной или газовой среде [1, 5]. С целью увеличения скорости отвода тепла от формируемых гранул данное устройство было конструктивно улучшено уменьшением пути движения расплава в воздушном пространстве, однако проблема формирования паровой прослойки вокруг капли, движущейся в охлаждающей жидкости, решена не была.

В зарубежной практике для получения гранулированных материалов широко используются методы газовой атомизации струи расплава (Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization) [6], а также наиболее близкий к рассматриваемому способу центрифугования расплава метод вращающегося электрода (Plasma Rotating Electrode Process) [7–10].

Технологический процесс газовой атомизации струи расплава представляет собой расплавление металла в плавильной камере, выливание его в форсунку (распылитель), где производится разрушение потока жидкого металла потоком инертного газа или воздуха с получением гранул. Промышленные сплавы обычно диспергируют потоком аргона.

Схема процесса распыления вращающегося электрода, оплаиваемого посредством возникающей электрической дуги (Plasma Rotating Electrode Process), представлена на рис. 1.

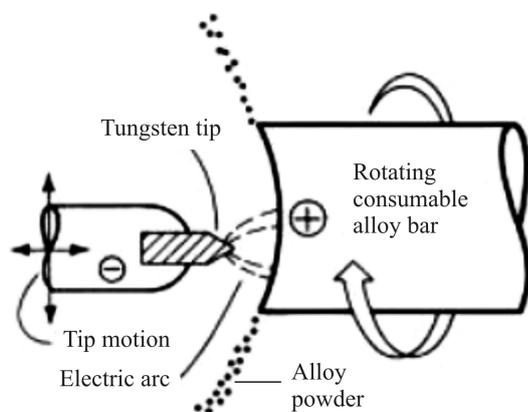


Рис. 1. Схема процесса распыления вращающегося электрода [7]

Fig. 1. Plasma Rotating Electrode Process [7]

Известно, что рассматриваемый метод широко применяется для получения гранул и порошков, в первую очередь тугоплавких материалов сплавов (никелевые, титановые сплавы) [11], при изготовлении сферических гранул нержавеющей и жаропрочных сталей [12], при получении гранул интерметаллидных материалов типа  $Ni_3Al$  и  $NiAl$  [13].

Главным недостатком вышерассмотренных двух методов является захват инертного газа в центр сферической гранулы, а также образование большого количества несферических частиц. Это происходит вследствие того, что струя расплава под воздействием высокоскоростного газового потока дробится сначала на плёнки, а затем плёнка расплава под действием сил поверхностного натяжения захлопывается, и при формировании капли происходит захват инертного газа внутрь частицы [13–16]. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев при реализации данного метода капли расплава преодолевают довольно большое расстояние до поверхности охлаждающей жидкости; формирование гранул происходит практически в воздушной среде или в среде инертного газа, характеризующейся малой теплопро-

водностью. Данный фактор снижает интенсивность отвода тепла от кристаллизуемой частицы.

Но основной причиной низкой применимости данных методов при производстве гранул алюминиевых сплавов является тот факт, что реализация рассматриваемых методов является довольно дорогостоящим процессом [17, 18]. На основе анализа мирового опыта можно отметить, что центрифугование расплава из вращающегося тигля с водным охлаждением, а также близкие к этому по технологии процессы более перспективны, дешевы и целесообразны для получения сферических гранул из алюминиевых и магниевых сплавов [19, 20].

Рассматриваемых технологических недостатков лишены методы центрифугования расплава из вращающегося тигля. Однако стоит отметить, что применение метода центрифугования при получении гранул из никелевых и титановых сплавов проблематично, так как необходимо исключить контакт расплава и воздушной среды. Это обусловлено тем, что насыщение гранул кислородом отрицательно сказывается на качестве получаемого сырья (особенно это важно при производстве гранул никелевых сплавов).

Рассматривая процесс кристаллизации и охлаждения гранулы в водной среде, можно отметить, что интенсивный отвод тепла неминуемо приводит к формированию прослойки паровой среды, как только ее температура превысит температуру кипения. Как только температура близлежащих слоев жидкости к охлаждаемой капле превышает температуру кипения, происходит преобразование жидкости в пар. Паровая прослойка значительно снижает отвод тепла за счет меньшей теплопроводности паровой среды (рис. 2).

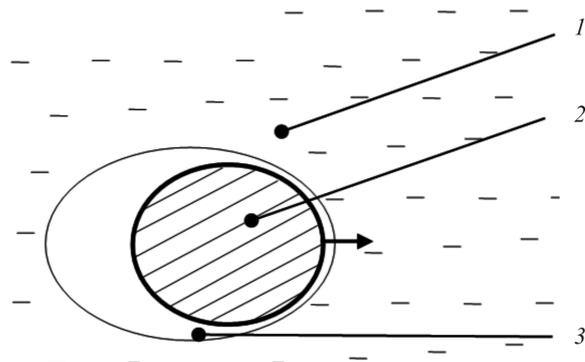


Рис. 2. Схема формирования паровой оболочки вокруг движущейся капли (гранулы): 1 – охлаждающая среда; 2 – капля расплава (гранула); 3 – паровая оболочка («паровая рубашка»)

Fig. 2. Scheme of the formation of a vapor shell around a moving droplet (granule): 1 – cooling liquid; 2 – a drop of melt (granule); 3 – «steam jacket»

На основе анализа данных табл. 1 можно утверждать, что теоретически снижение интенсивности теплоотвода за счет снижения теплопроводности охлаждающей среды может составлять сотни и тысячи процентов.

Таблица 1

Величины коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости воды и насыщенного пара [21]

Table 1

The values of the coefficients of thermal conductivity and specific heat capacity of water and saturated steam [21]

Состояние охлаждающей среды	Температура, °С	Давление насыщенного пара $P_n$ , МПа	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К	Удельная теплоемкость $C_p$ , кДж/кг·°С
Техническая вода	20	–	0,5984	4,1818
Техническая вода	50	–	0,6435	4,1806
Техническая вода	90	–	0,6753	4,2050
Техническая вода	100	–	0,6791	4,2159
Насыщенный пар	100	0,101	0,0279	2,0267
Насыщенный пар	100	2,03	0,684	2,1037
Насыщенный пар	150	0,101	0,0284	2,315
Насыщенный пар	150	2,03	0,684	–
Насыщенный пар	190	0,101	0,0326	–
Насыщенный пар	190	2,03	0,67	–

До настоящего времени задача определения детального температурного поля кристаллизующейся капли высоколегированных алюминиевых расплавов в процессе ее свободного движения в охлаждающей среде, а также температурные изменения в близлежащих к капле слоях жидкости практически не решалась. Известны лишь аналитические зависимости для определения времени кристаллизации сплавов таких материалов, дающие приближенную оценку усредненной по объему температуры частицы [20].

Известны результаты исследований, направленных на создание математической модели для описания теплофизических процессов, происходящих при формировании гранул расплава системы Al – 15 % Pb в водной среде [22, 23]. Построенная математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений неразрывности, сохранения импульса и сохранения энергии. Уравнение энергии включает члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение при фазовом переходе в расплаве капли при кристаллизации и при закипании воды. Кроме того, определено, что так как движение жидкости вблизи движущейся кристаллизующейся частицы имеет турбулентный характер, то учитываются и турбулентные пульсации охлаждающей жидкости [22, 24].

Единственным способом удаления препятствия в виде паровой прослойки является постоянный сбив последней за счет высокой скорости движения капли в охлаждающей среде. Причем скорость должна быть настолько велика, чтобы за время, необходимое на преодоление пути капель, равного её диаметру и пройденного каплей, не успела сформироваться паровая прослойка, объем, которой будет превышать 1 % объема капли. В противном случае паровая прослойка начинает оказывать существенное влияние на интенсивность теплоотвода.

На основе этого положения был предложен способ получения гранул из алюминиевых сплавов, обеспечивающий достаточную первоначальную скорость движения капли [25].

Для того чтобы в начальные моменты времени попадания капли в охлаждающую среду вокруг движущейся капли не успевала сформироваться паровая прослойка, первоначальная скорость движения капли в охлаждающей жидкости ( $V$ , м/с) должна быть не меньше расчетной по формуле (1):

$$V \geq \frac{k \cdot r^3 \cdot \rho \cdot \alpha_k \cdot (T - T_{\text{ок.ср.}})}{m \cdot \gamma \cdot (C_{\text{ок.ср.}} \cdot (T_k - T_{\text{ок.ср.}}) + Q_0)}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус капли, м;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи капли охлаждающей среде, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\rho$  – плотность расплава металла, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\text{ок.ср.}}$  – температура охлаждающей среды, К;  $T$  – температура кристаллизующейся капли, К;  $m$  – масса капли металла, кг;  $\gamma$  – объемная масса паровой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{ок.ср.}}$  – удельная теплоемкость охлаждающей среды, Дж/кг·К;  $T_k$  – температура парообразования охлаждающей среды, К;  $Q_0$  – удельная теплота парообразования охлаждающей среды, Дж/кг;  $k$  – коэффициент, который для получения гранул алюминиевых сплавов систем Al–Zn–Mg–Cu, Al–Cu–Mg, Al–Mg составляет 2518,3 [25].

Необходимо отметить, что в качестве температуры кристаллизации гранул из заданного материала  $T$ , при условии, что исследуемый материал кристаллизуется в интервале температур от температуры ликвидуса до температуры солидуса, целесообразно выбирать температуру ликвидуса, т.е. температуру, при которой из жидкого раствора с данной концентрацией могут появляться первые равновесные с ним кристаллы.

Для обеспечения такой скорости движения капли расплава в первоначальный момент времени был предложен способ получения металлических гранул и устройство для центробежного гранулирования расплава. Для обеспечения заданной скорости первоначального движения капли число оборотов вращения подвижного тигля с расплавом ( $v$ , с<sup>-1</sup>) определяется на основе соотношения

$$v = V / (2 \cdot \pi \cdot R_T), \quad (2)$$

где  $R_T$  – средний радиус внешней стенки разливочной емкости, м.

Установлено, что при такой начальной скорости движения капли на начальном этапе кристаллизации, возникающей в результате испарения близлежащих к грануле слоев охлаждающей жидкости, паровой прослойки объемом менее 1 % от объема гранулы недостаточно для влияния на потерю интенсивности теплоотвода. Мгновенное положение капли за это время успевает сместиться в зону наличия «свежей» охлаждающей жидкости.

Естественно, что при движении капли в охлаждающей среде за счет сопротивления жидкости скорость капли снижается. На последнем этапе движения капля или ударяется о стенки закалочного бака или, в случае частичного расплющивания капли о поверхность воды, за счет торможения жидкостью горизонтальное движение капли прекращается, и она под влиянием силы тяжести плавно опускается на дно приемного бака. Принципиально важным для увеличения интенсивности кристаллизации является сбивание «паровой рубашки», образующейся вокруг капли на первоначальном этапе до перехода металла из жидкого состояния в твердое по всему объему формирующейся частицы. Очевидно, что устранение проблемы наличия «паровой рубашки» позволяет значительно увеличить скорость теплоотвода, а следовательно, и скорость кристаллизации, и тем самым получить гранулированные материалы с более высокими прочностными характеристиками.

Таким образом, может быть сформулирована задача необходимости исследования процессов получения гранул алюминиевых сплавов со сверхвысокими скоростями кристаллизации в условиях сбива паровой оболочки, снижающей скорость отвода тепла от кристаллизующейся гранулы с целью получения повышенных прочностных характеристик гранулированных материалов.

## 2. Методика проведения исследований

Как было установлено ранее, основным препятствием на пути отвода тепла от кристаллизующегося объекта и, соответственно, на пути увеличения скорости кристаллизации является паровая прослойка, возникающая за счет нагрева и перехода близлежащих слоев воды в парообразное состояние. С другой стороны интенсивность охлаждения расплава напрямую зависит от размеров гранул. Следовательно, одной из задач исследований является получение гранул равномерного гранулированного состава промышленного размера с контролируемой высокой скоростью их кристаллизации.

Получение гранул промышленных алюминиевых сплавов В95, В96ц проводилось на установке центростремительного разбрызгивания расплава. Принципиальная схема установки представлена на рис. 3.

Установка для получения гранул со сверхвысокими скоростями кристаллизации состоит из внешнего кор-

пуса 1, который одновременно является закалочным баком. Внутри корпуса установлен вращающийся разделительный стакан 2 с отверстиями для свободного пролета гранул. Назначение разделительного стакана заключается в создании воронки охлаждающей жидкости 5 при его вращении и исключение попадания жидкости во вращающийся тигель 3 с расплавом 4. За счет вращения тигля расплав выдавливается в предусмотренные в нем каналы, разбивается на капли и пролетает сквозь отверстия разделительного стакана. Попадая в охлаждающую жидкость, капли расплава кристаллизуются в гранулы. Принципиально важным является сбалансированность одновременного вращения тигля и разделительного стакана и то, что отверстия в стакане должны быть значительно больше отверстий в тигле (в 5–6 раз) для свободного пролета капли расплава. Диаметр отверстий внутреннего тигля 4 определяет диаметр получаемых гранул. Суспензия в виде полученных гранул и охлаждающей жидкости выводится через отверстие в патрубке 6. Вращательное движение от электродвигателя 7 подвижным элементам системы обеспечивается через систему валов 8 и муфт 9. Принципиально важным является наличие жесткой связи 10 между разделительным стаканом и тиглем для обеспечения сбалансированности их совместного вращения. Устойчивость вращающихся элементов устройства обеспечивается системой подшипников 11. Поступление расплава в установку происходит через отверстие в крышке 12; поступление охлаждающей жидкости происходит через отверстие в корпусе закалочного бака 1. В тигле, формирующем капли расплава, выполнены отверстия по образующей диаметром 1,0–1,5 мм; диаметр отверстий в перфорированном разделительном стакане составлял 6,0 мм.

Известно, что при скорости вращения тела, погруженного в воду, более 3500 об./мин, как и для данного устройства, вода за счет формирования воздушного потока и водной воронки отбрасывается от него, и возникает прослойка воздушной среды между поверхностью вращающегося разделительного стакана и поверхностью воронки охлаждающей жидкости. Благодаря конструкции устройства удается свести к минимуму траекторию полета капли расплава в воздушной среде и в результате сохранить температуру капель расплава в момент соприкосновения с охлаждающей жидкостью, равной температуре расплава в разливочной емкости, что, в свою очередь, способствует увеличению скорости кристаллизации.

Принципиально важной является скорость вращения тигля с расплавленным металлом, которая задает требуемую поступательную скорость движения капли, обеспечивающей сбив «паровой рубашки» вокруг кристаллизующейся гранулы. Соответственно, кристаллизация гранулы происходит в условиях интенсивного отвода тепла в воду, а не в образующуюся паровую оболочку. В табл. 2 представлены оптимальные скорости вращения тигля, обеспечивающие сбив паровой оболочки для устройства, схема которого представлена на рис. 3.

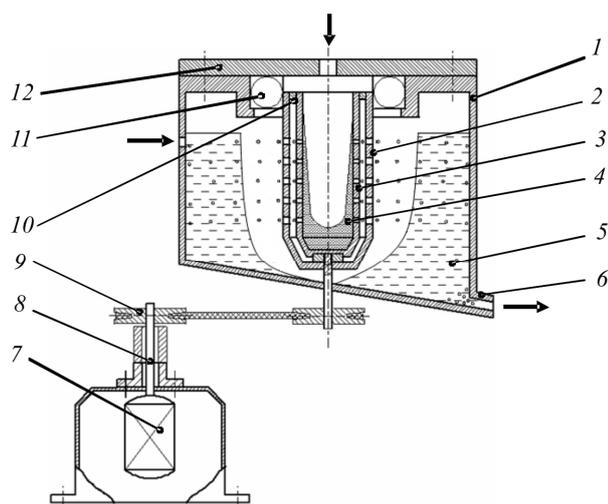


Рис. 3. Принципиальная схема установки для получения гранул со сверхвысокими скоростями кристаллизации

Fig. 3. Scheme of the installation for producing granules with ultra-high crystallization rates

Таблица 2

Оптимальные скорости вращения перфорированного тигля для получения качественных гранул алюминиевых сплавов при реализации эффекта сбива паровой оболочки

Table 2

Optimal rotation speeds of the perforated crucible for obtaining high-quality aluminum alloy granules when implementing the effect of knocking down the steam shell

Система исследуемого сплава	Рекомендуемая скорость вращения тигля, мин <sup>-1</sup>
Al–Zn–Mg–Cu	4200–4300
Al–Mg	3800–4100

Промывка и рассеивание гранул по фракциям проводились по традиционным для порошковой металлургии методикам. Технология предварительного брикетирования включала в себя ряд операций: подготовка брикета осуществлялась засыпкой в стакан из листового алюминиевого материала, нагревом до 340–380 °С в электропечи сопротивления СНО 4.8.2,5/10-И2 и последующее брикетирование в глухую матрицу на вер-

тикальном гидравлическом прессе усилием 1,6 МН. В целях избегания попадания смазки или ее паров внутрь алюминиевого стакана брикетирование проводилось без смазки. Полученные брикеты обтачивались и подвергались нагреву и последующему прессованию на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 1,0 МН с получением прутков заданного диаметра с коэффициентом вытяжки λ, равным 40. Температура прессования составляла 380–420 °С. Подогрев контейнера велся температуры 340–360 °С.

Закалка и искусственное старение прессованных прутков из сплавов В95, В96ц проводились по стандартной для исследуемых сплавов технологии. Известно, что основной проблемой широкого промышленного применения алюминиевых сплавов В95, В96, В96ц является их склонность к коррозионному растрескиванию и расслаивающей коррозии. Попытки увеличения прочности сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu за счет повышения содержания основных легирующих компонентов (в первую очередь цинка и магния) показали, что при содержании 10 % Zn, 4–4,5 % Mg, 1,5 % Cu, 0,4 % Mn и 0,2 % Cr предел прочности сплавов можно повысить до 800–810 МПа, однако при этом пластичность и сопротивление коррозионному растрескиванию снижаются столь сильно, что сплавы не могут применяться в качестве конструкционного материала [1, 3].

Для снижения склонности к коррозии для гранулированного сплава В96ц применялась термообработка по смягчающим режимам Т2 и Т3. В табл. 3 представлены режимы термообработки.

Длительность перерыва между закалкой и старением для прессованных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов В95 и В96ц оказывает большое значение на прочностные характеристики материала. В целях получения максимальных прочностных характеристик на основании рекомендаций [1, 3] длительность перерыва между закалкой и старением для образцов прессованного материала составляла 48 ч.

Испытания образцов для определения механических свойств материала, полученных из прессованных полуфабрикатов, проводились по стандартным методикам на универсальной электромеханической разрывной машине Instron 5982.

Таблица 3

Режимы термообработки прессованных изделий из гранулированных материалов сплава В96ц

Table 3

Parameters of heat treatment of pressed products made of granular materials of aluminum alloy 7070

Исследуемый сплав	Температура закалки	Искусственное старение по смягчающему режиму (Т2)		Искусственное старение по смягчающему режиму (Т3)	
		Температура нагрева, °С	Длительность выдержки, ч	Температура нагрева, °С	Длительность выдержки, ч
В96ц	465–470 °С	160–170	16	170–180	20

Соотношение скоростей кристаллизуемых объектов [3]

Table 4

The ratio of the velocities of crystallized objects [3]

Характеристика объекта	Скорость охлаждения			Время кристаллизации объекта $\tau_{кр}$ , с
	$v_{лин}$ , см/с	$v_{об}$ , 1/с	$v_{охл}$ , °C/с	
Слиток диаметром 100 мм, получаемый методом непрерывного литья	0,4	50	1	1
Проволока диаметром 6 мм, охлаждение водой	10	$5 \cdot 10^2$	10	0,1
Гранулы, диаметром 1–4 мм, охлаждение водой	–	$5 \cdot 10^3$	100	0,01
Гранулы, диаметром 500 мкм, охлаждение водой	–	$5 \cdot 10^4$	1000	0,001
Гранулы, диаметром 500 мкм, охлаждение на воздухе	–	$5 \cdot 10^2$	10	0,1
Гранулы, диаметром 50 мкм, охлаждение на воздухе	–	$5 \cdot 10^3$	100	0,01

### 3. Анализ и обсуждение полученных результатов

В описании процессов кристаллизации слитков или гранул довольно часто применяют показатели линейной скорости кристаллизации  $v_{лин}$ , измеряемой в см/с, и объемную скорость кристаллизации  $v_{об}$ , измеряемой в 1/с. Линейную скорость кристаллизации наиболее часто применяют при описании процесса кристаллизации слитков. В случае кристаллизации слитков объемная скорость кристаллизации прямо пропорциональна линейной скорости кристаллизации. При кристаллизации гранул эта зависимость искажается, так как скорость кристаллизации будет определяться не только отводом тепла от наружной поверхности гранул, но и переохлаждением расплава в процессе кристаллизации [3]. Объемную скорость кристаллизации  $v_{об}$  в этом случае определить сложнее и поэтому довольно часто пользуются пропорциональной ей величиной скорости охлаждения  $v_{охл}$ , измеряемой в °C/с. В табл. 4 представлено соотношение скоростей кристаллизации и скоростей охлаждения.

В связи с тем что очевидна взаимосвязь между скоростью кристаллизации и скоростью отвода тепла от гранулы (см. табл. 4), можно сказать, что при изменении скорости охлаждения  $v_{охл}$  пропорционально изменяется и объемная скорость кристаллизации  $v_{об}$ . Следовательно, при неизменных размерах гранул в целях увеличения скорости кристаллизации задача состоит в том, чтобы:

1) максимально возможно уменьшить время между отделением капли от всей массы расплавленного металла и попаданием ее в закалочную среду;

2) обеспечить отсутствие контакта капли расплава и воздушной среды или, другими словами, обеспечить отсутствие паровых прослоек между телом гранулы и окружающей закалочной средой.

Именно это обеспечивалось быстрым (3500–4000 об./мин) вращением устройства центрифугирования расплава и высокой скоростью движения капли внутри закалочного бака с охлаждающей средой.

Оценка гранулометрического состава фракций исследуемых сплавов показала однородность гранул по размерам и форме. Гранулы имели сферический приплюснутый вид. Как показали результаты исследова-

ний, на выходе из отверстий тигля гранулы, вероятнее всего, имели веретенообразный вид (вытянутый за счет центробежного ускорения), однако при высокой скорости движения и ударе о поверхность воды принимали сферическую приплюснутую форму. Это подтверждается тем, что диаметр полученных гранул немного больше выходного отверстия в тигле с расплавом (на 2–5 %).

При исследованиях особенностей получения гранул центрифугированием указывается на неоднородные размеры получаемых гранул [1, 5]. Из гипотез авторов следует, что решающим фактором в получении разнородной гранулометрического состава является давление верхних слоев расплава на нижние слои. При этом капли дополнительно выдавливаются в отверстия в нижней зоне тигля за счет силы тяжести. Для выравнивания гранулометрического состава предлагалось уменьшать размер выходных отверстий разбрызгивающего тигля в направлении дна сосуда.

В данном случае влияние этого давления сводился к минимуму и, как показали эксперименты, гранулометрический состав довольно однородный. В табл. 5 представлен размерный состав гранул исследованных материалов.

Таблица 5

Результаты гранулометрических исследований

Table 5

Results of granulometric studies

Сплав	Скорость вращения сосуда разбрызгивателя, об./мин	Диаметр отверстий-каналов в сосуде-разбрызгивателе, мм	Выход фракций гранул, в %, крупностью, мм			
			св. 2,5	2,4–1,5	1,5–1,0	до 1,0
В96ц	600	1,0	38	61	1	0
В96ц	1000	1,0	19	69	11	1
В96ц	3500	1,0	7	21	65	7
В96ц	4000	1,0	3	18	70	9

Оценка скорости охлаждения гранул проводилась по методикам, предложенным в [22, 23], с учетом турбулентности возмущений водной охлаждающей среды

в зоне контакта с каплей расплавленного металла [24, 25]. Расчетная скорость охлаждения капель в большой степени зависит от диаметра капли (гранулы): с увеличением диаметра капли расплава скорость охлаждения резко падает. В табл. 6 представлены результаты определения расчетной скорости охлаждения капель расплава алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu (сплавы В95 и В96ц).

Таблица 6

Расчетная скорость охлаждения гранул при скорости вращения перфорированного тигля 4000 об./мин

Table 6

The calculated cooling rate of granules at the rotation speed of the perforated crucible is 4000 rpm

Диаметр гранулы, мм	Расчетная средняя скорость охлаждения капли $v_{\text{охл}}$ , °C/c	Максимальная расчетная скорость охлаждения капли $v_{\text{охл}}$ в первоначальный момент времени попадания капли в жидкую среду, °C/c ( $\tau = 0 \div 0,1$ с)
1,0	2250	3400
1,5	2100	2950
2,0	1650	2500
2,5	1400	2150
3,0	1150	1900
3,5	990	1750

Анализируя данные по скоростям охлаждения гранул алюминиевых сплавов, видно, что применение методики получения гранул в условиях сбива «паровой рубашки» приводит к тому что для гранул диаметром 1,0–3,5 мм, которые довольно широко применяются при получении гранулированных материалов, удалось достичь скоростей

охлаждения (а следовательно, и скоростей кристаллизации), свойственных при водном охлаждении порошинок диаметром 0,1–0,5 мм. Известно, что для алюминиевых сплавов сложного состава увеличение скорости охлаждения, скорости кристаллизации гранул должно характеризоваться ростом прочностных свойств как материала самих гранул, так и материала получаемых из гранул полуфабрикатов.

Основной задачей проводимых исследований являлось получение прутковых полуфабрикатов из гранулированных материалов из сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu. Исследования показали рост прочностных характеристик закланных и искусственно состаренных полуфабрикатов по отношению к прессованным изделиям, полученных из гранул традиционной технологии гранулирования (табл. 7).

Установлено, что увеличение диаметра отверстий-каналов в тигле до диаметра в 1,5 мм влияет на размеры гранул, но не воздействует существенно на гранулометрический состав получаемых гранул, что подтверждает стабильность рассматриваемого способа центрифугования алюминиевых сплавов.

Известно, что при горячей обработке давлением гранулированных материалов системы Al–Zn–Mg–Cu при температуре нагрева выше 350 °C наблюдается снижение механических свойств получаемых материалов [28, 29]. Однако при проведении экспериментальных исследований было установлено, что повышение температуры прессования гранулированных материалов системы Al–Zn–Mg–Cu до 380–420 °C не приводит к снижению механических характеристик полуфабрикатов. Это обусловлено высокой степенью деформации (больших коэффициентов вытяжки  $\lambda \sim 40$ ) и благоприятной

Таблица 7

Механические свойства полученных гранулированных материалов

Table 7

Mechanical properties of the obtained granular materials

Исследуемый сплав	Вид полуфабриката и его технология получения	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Источник
В96ц	Прессованные прутки из слитка	610	360	10,3	[1]
В96ц	Прессованные прутки из слитка	680	640	7	[3]
В96ц	Прессованные прутки из слитка	650	630	6	[26]
В96ц	Прессованные прутки из гранул	730	–	10,5–15,3	[1, 3]
В96ц	Прессованные прутки из гранул. Нагрев гранул перед компактированием и брикета в воздушной среде	710	–	3,4	[1]
В96ц	Прессованные прутки из гранул. Нагрев гранул перед компактированием и брикета в инертной среде аргона или вакууме	780	–	5,7–6,1	[1]
В96ц	Прессованные прутки из гранул. Сплавы, содержащие цирконий в пределах от 0,4 до 1,0 %.	765	730	4,3–5,9	[3]
В96ц	Прессование из гранул, полученных по технологии со сверхвысокими скоростями кристаллизации	890	830	4,6–5,4	Получен. данные
В95	Прессованные прутки из слитка	530	480	11	[26]
В95	Прессованные прутки из слитка	550	500	10	[27]
В95	Прессованные прутки из гранул	580	510	6,0–6,4	[1, 3]
В95	Прессование из гранул, полученных по технологии со сверхвысокими скоростями кристаллизации	760	710	5,1–5,8	Получен. данные

схемой для консолидации гранул в очаге деформации (всестороннее сжатие).

При изготовлении деталей авиационной техники одним из наиболее важных факторов перспективности новой технологии или новых материалов является тот факт, что полученные материалы должны отличаться стабильностью свойств в течение всего срока эксплуатации авиационного аппарата.

Проведенные исследования показали, что при длительной выдержке и эксплуатации изделий (более 10–12 лет), полученных по новой технологии гранулирования, прессованные материалы в закаленном и искусственно состаренном состоянии не подвержены расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию при отсутствии воздействия агрессивных сред. Прочностные характеристики исследуемых гранулированных материалов из сплавов В95, В96ц за продолжительное время также не снижаются.

## Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что наиболее действенным методом увеличения скорости охлаждения гранул алюминиевых сплавов системы Al – Zn – Mg – Cu является технология создания высокой первоначальной скорости капель расплава при его центрифугировании, которая обеспечивает сбив паровой прослойки («паровой рубашки»), формирующейся вокруг кристаллизующейся гранулы при попадании последней в охлаждающую жидкость.

За счет высокой скорости кристаллизации капель обеспечивается не только повышенная микротвердость гранул, по сравнению с традиционными методами гранулирования, но и, что более важно, обеспечивается повышение прочностных характеристик прессованных

изделий (прутков, авиационных профилей), получаемых из гранулируемых материалов В95, В96ц. Увеличение прочностных характеристик прессованных изделий из вышеперечисленных сплавов системы Al – Zn – Mg – Cu может достигать 10–15 % по сравнению с пресс-изделиями из алюминиевых сплавов, получаемых по традиционным технологиям гранулирования. В частности, для прессованных изделий из сплава В96ц механические свойства материала, полученного по предлагаемой технологии, составляют  $\sigma_b = 890$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 830$  МПа,  $\delta = 4,6–5,4$  %; для изделий из сплава В95 –  $\sigma_b = 760$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 710$  МПа,  $\delta = 5,1–5,8$  %;

Определено влияние временного фактора длительного хранения или эксплуатации изделий (порядка 10–12 лет) на изменение прочностных характеристик гранулированных высокопрочных алюминиевых сплавов В95, В96ц. Установлено, что при длительной эксплуатации и хранения изделий механические свойства полученных гранулированных материалов не снижаются.

В результате проведенного комплекса исследований разработаны конкретные параметры технологических процессов гранулирования сплавов системы Al – Zn – Mg – Cu и получения прессованных изделий по рассматриваемой технологии для ее промышленного применения.

Необходимо отметить, что примерно сопоставимые результаты и закономерности получаются при исследовании получения гранулированных материалов по рассматриваемой технологии из алюминиевых сплавов Д1 и Д16 системы Al – Cu – Mg [30]. Данный факт позволяет говорить о существовании общих закономерностей эффекта повышения скоростей кристаллизации гранул из других материалов путем исключения воздействия паровой прослойки, образующейся при испарении охлаждающей жидкости.

## Библиографический список

1. Колпашников А.И., Ефремов А.В. Гранулированные материалы. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.
2. Добаткин В.И. Слитки алюминиевых сплавов. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 176 с.
3. Добаткин В.И., Елагин В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
4. Пат. на изобретение № 2032498. Способ получения сферических гранул / Анкудинов В.Б., Марухин Ю.А. 10 апреля 1995 г. – 3 с.
5. АС изобретение РФ № 403445. Устройство для центробежной грануляции расплава / Колпашников А.И., Ефремов А.В., Силин М.Б. Опубли. 26.10.1973. Бюл. № 3 – 2 с.
6. Murr L.E., Gaytan S.M. Electron Beam Melting // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – Vol. 10. – P. 135–161.
7. Samal S. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing // Journal of cleaner production. – 20107. – Vol. 142. – P. 3131–3150.
8. Angelo P.C., Subramanian R. Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications // PHI Learning Pvt. Ltd., 2008. – 312 p.
9. Arc plasma assisted rotating electrode process for preparation of metal pebbles, in Discharges and Electrical Insulation in Vacuum

(ISDEIV) / T. Mohanty, B. Tripathi, T. Mahata, P. Sinha // 2014 International Symposium on. – 2014. – P. 741–744.

10. Востриков А.В., Сухов Д.И. Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 8 (44). – Ст. 03. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2021).

11. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti – 6Al – 4V powder fractions / J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213 (12). – P. 2109–2118.

12. Plasma-assisted preparation and characterization of spherical stainless steel powders / H. Zhu, H. Tong, F. Yang, C. Cheng // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 252. – P. 559–566.

13. Сентюрин Ж.А. Получение сферических порошков из сплавов на основе алюминид никеля NiAl для аддитивных технологий: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИС, 2016. – 168 с.

14. Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders / M. Entezarian, F. Allaire, P. Tsantrizos, R.A. Drew // *The journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 1996. – Vol. 48 (6). – P. 53–55.

15. Волков А.М., Шестакова А.А., Бакрадце М.М. Сравнение гранул, полученных методами газовой атомизации центробежного распыления литых заготовок, с точки зрения применения их для изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов [Электронный ресурс] // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2018. – № 11. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19. – URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2021).

16. Береснев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // *Вестник МАИ*. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 83–89.

17. Альтернативные технологии повышения механических свойств гранулированных жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД (обзор) [Электронный ресурс] / А.М. Волков, М.М. Карашаев, М.М. Бакрадце, Т.О. Пустыльников // DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19. – URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2021).

18. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. Numerical model of electrode induction melting for gas atomization // *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. – 2011. – Vol. 30 (5). – P. 1455–1466.

19. Ario Sunar Baskoro, Sugeng Supriadi and Dharmanto. Review on plasma atomizer technology for metal powder // *MATEC Web of Conferences* 269. – 05004 (2019) IW. – 2018. – 201926905004

20. Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer / Y. Xia, L. Khezzar, M. Alshehhi, Y. Hardalupas // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2017. – Vol. 94. – P. 31–43.

## References

1. Kolpashnikov A.I., Efremov A.V. *Granulirovannye materialy* [Granular materials]. Moscow, Metallurgiya, 1977, 240 p.

2. Dobatkin V.I. *Slitki aluminievyykh splavov* [Ingots of aluminum alloys]. Sverdlovsk, Metallurgizdat, 1960, 176 p.

3. Dobatkin V.I., Elagin V.I. *Granuliruemye aluminievye splavy* [Granulated aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1981, 176 p.

4. Ankudinov V.B., Marukhin Iu.A. *Sposob polucheniia sfericheskikh granul*. Patent na izobretenie no. 2032498, 10 aprilia 1995, 3 p.

5. Kolpashnikov A.I., Efremov A.V., Silin M.B. *Ustroistvo dlia tsentrobeznoi granulatsii rasplava* [A device for centrifugal granulation of the melt]. *Avtorskoe svidetel'stvo izobreteniia*. no. 403445. Opublikovano 26.10.1973, *Biulleten'* no. 3, 2 p.

6. Murr L.E., Gaytan S.M. *Electron Beam Melting*. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol. 10, pp. 135–161.

7. Samal S. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing. *Journal of cleaner production*, 2017, vol. 142, pp. 3131–3150.

8. Angelo P.C., Subramanian R. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2008, p. 312.

9. Mohanty T., Tripathi B., Mahata T., and Sinha P. Arc plasma assisted rotating electrode process for preparation of metal pebbles, in *Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, 2014 International Symposium on, 2014, pp. 741–744.

21. Волков А.И., Жарский И.М. *Большой химический справочник*. – Минск: Современная школа, 2005. – 608 с.

22. Скуратов А.П., Пьяных А.А. Расчетное исследование скорости охлаждения капли алюминиевого расплава в водной среде. // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2009. – № 1. – С. 233–235.

23. 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.

24. Launder В.Е., Spalding D.B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. – London, England: Academic Press, 1972. – P. 157–162.

25. Пат. на изобретение РФ № 2117556. Способ получения металлических гранул / Силин М.Б., Жаров М.В. – 1998. – 5 с.

26. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985 – Т. 1: Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под ред. Е.И. Семенова. 1985. – 568 с.

27. *Промышленные алюминиевые сплавы* / под ред. Ф.И. Квасова, И.Н. Фридияндера. – М.: Металлургия, 1972. – 552 с.

28. Белокопытов В.И. Разработка технологии штамповки поковок из предварительно скомпактированных гранул алюминиевых сплавов // *Вестник Магнитогорского государственного технологического университета им. Г.И. Носова*. – 2016. – Т. 14, № 3. – С. 25–31.

29. Братухин А.Г., Масленков С.Б., Логунов А.В. Физико-химические основы технологии жидкофазного спекания гранул // *Материаловедение*. – 1997. – № 2. – С. 53–56.

30. Жаров М.В. Исследование влияния скоростей кристаллизации гранул на прочностные характеристики прессованных полуфабрикатов системы Al – Cu – Mg // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 20–28.

10. Vostrikov A.V., Sukhov D.I. *Proizvodstvo granul metodom PREP dlia additivnykh tekhnologii – tekushchii status i perspektivy razvitiia* [Production of granules by the PREP method for additive technologies - current status and development prospects]. *Trudy VIAM: elektron. na-uch.-tekhnich. Zhurn*, 2016, no. 8 (44), st. 03. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3.

11. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti – 6Al – 4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213 (12), pp. 2109–2118.

12. Zhu H., Tong H., Yang F. and Cheng C. Plasma-assisted preparation and characterization of spherical stainless steel powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 252, pp. 559–566.

13. Sentiurina Zh.A. *Poluchenie sfericheskikh poroshkov iz splavov na osnove aluminida nikelia NiAl dlia additivnykh tekhnologii*. Dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Moscow, MISIS, 2016, 168 p.

14. Entezarian M., Allaire F., Tsantrizos P., Drew R.A. Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders. *The journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 1996, vol. 48 (6), pp. 53–55.

15. Volkov A.M., Shestakova A.A., Bakradze M.M. *Sravnenie granul, poluchennykh metodami gazovoi atomizatsii tsentrobezhnogo raspyleniia litykh zagotovok, s tochki zreniia prime-*

neniia ikh dlia izgotovleniia diskov GTD iz zharoprochnykh nikelovykh splavov [Comparison of granules obtained by gas atomization and centrifugal spraying of cast billets from the point of view of their application for the manufacture of gas turbine engine disks from heat-resistant nickel alloys]. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. Zhurn*, 2018, no. 11. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.

16. Beresnev A.G., Logunov A.V., Logacheva A.I. Problemy povysheniia kachestva zharoprochnykh splavov, poluchaemykh metodom metallurgii granul [Problems of improving the quality of heat-resistant alloys obtained by the metallurgy of granules]. *Vestnik MAI*, 2008, vol. 15, no. 3. pp. 83-89.

17. Volkov A.M., Karashaev M.M., Bakradze M.M., Pustynnikov T.O. Alternativnye tekhnologii povysheniia mekhanicheskikh svoystv granulirovannykh zharoprochnykh nikelovykh splavov dlia diskov GTD (obzor) [Alternative technologies for improving the mechanical properties of granulated heat-resistant nickel alloys for gas turbine disks (review)]. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.

18. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. Numerical model of electrode induction melting for gas atomization. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2011, vol. 30 (5), pp. 1455-1466.

19. Ario Sunar Baskoro, Sugeng Supriadi and Dharmanto. Review on plasma atomizer technology for metal powder. MATEC Web of Conferences 269, 05004 (2019) IJW 2018. *Rezhim dostupa* DOI: 10.1051/mateconf/201926905004

20. Xia Y., Khezzer L., Alshehhi M. and Y. Hardalupas. Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, vol. 94, pp. 31-43.

21. Volkov A.I., Zharskii I.M. Bol'shoi khimicheskii spravochnik [Big chemical reference book]. Minsk, Sovremennaiia shkola, 2005, 608 p.

22. Skuratov A.P., P'ianykh A.A. Raschetnoe issledovanie skorosti okhlazhdeniia kapli aluminievogo rasplava v vodnoi srede [Computational study of the cooling rate of a drop of alumi-

num melt in an aqueous medium]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2009, no. 1, pp. 233-235.

23. Skuratov A.P., P'ianykh A.A. Teploobmen pri granulirovani svintsovosoderzhashchikh aluminievyykh splavov v vodnoi srede [Heat transfer during the granulation of lead-containing aluminum alloys in an aqueous medium]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2012. vol. 19, no. 2 pp. 155-162.

24. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London, England: Academic Press, 1972. P. 157-162.

25. Silin M.B., Zharov M.V. Sposob polucheniia metallicheskih granul. Patent na izobrenenie no. 2117556, 1998, 5 p.

26. Kovka i shtampovka: Spravochnik. V 4-kh t. [Forging and stamping: Handbook. In 4 volumes] Red. sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. Moscow, Mashinostroenie, 1985, vol. 1, Materialy i nagrev. Oborudovanie. Kovka. Pod red. E.I. Semanova, 1985, 568 p.

27. Promyshlennyye aluminievyye splavy [Industrial aluminum alloys]. Pod red. F.I. Kvasova, I.N. Fridliandera. Moscow, Metallurgiya, 1972, 552 p.

28. Belokopytov V.I. Razrabotka tekhnologii shtampovki pokovok iz predvaritel'no skompaktirvannykh granul aluminievyykh splavov [Development of technology for stamping forgings from pre-compacted aluminum alloy granules]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. G.I Nosova*, 2016., vol. 14, no. 3, pp. 25-31.

29. Bratukhin A.G., Maslennikov S.B., Logunov A.V. Fizikokhimicheskie osnovy tekhnologii zhidkofaznogo spekanii granul [Physicochemical foundations of the technology of liquid-phase sintering of granules]. *Materialovedenie*, 1997, no. 2, pp. 53-56.

30. Zharov M.V. Issledovanie vliianiia skorostei kristallizatsii granul na prochnostnye kharakteristiki pressovannykh polufabrikatov sistemy Al – Cu – Mg [Study of the effect of the crystallization rates of granules on the strength characteristics of pressed semi-finished products of the Al – Cu – Mg system]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 20-28.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Financing.** The study was not sponsored.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.