

Жаров М.В. Исследование влияния скоростей кристаллизации гранул на прочностные характеристики прессованных полуфабрикатов алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 20–28. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.03

Zharov M.V. Investigation of the effect of granule crystallization rates on the strength characteristics of pressed semi-finished aluminum alloys of the Al–Cu–Mg system. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 20–28. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.03

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 3, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.03  
УДК 621.763

**М.В. Жаров**

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТЕЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНУЛ  
НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕССОВАННЫХ  
ПОЛУФАБРИКАТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Mg**

Анализируются механизмы интенсификации отвода тепла от кристаллизующихся гранул металлических материалов при производстве гранулята в промышленных масштабах. Известно, что технологии с применением высоких скоростей кристаллизации обеспечивают получение значительного упрочняющего эффекта гранулированного материала от легирования алюминиевых сплавов тугоплавкими компонентами, нерастворимыми 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–Cu–Mg, Al–Zn–Mg–Cu, Al–Mg с легированием тугоплавкими элементами в гораздо большем количестве, чем это применяется для существующих сплавов. Одним из основных факторов, влияющих на формирование пересыщенных твердых растворов и субмикроскопической структуры материала, является скорость кристаллизации, которая, в свою очередь, определяется скоростью отвода тепла от формируемой гранулы. Установлено, что 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. Предлагается технология интенсификации отвода тепла кристаллизующихся гранул алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg с целью повышения скорости кристаллизации. Основой метода является технология удаления «паровой рубашки», неизбежно возникающей вокруг кристаллизующейся капли расплава при попадании последней в водную охлаждающую среду. Сбив паровой оболочки возможен при увеличении скорости движения кристаллизующегося объекта в водной охлаждающей среде. Соответственно, при отсутствии паровой оболочки вокруг кристаллизующейся капли значительно увеличивается коэффициент теплопроводности охлаждающей среды и повышается интенсивность отвода тепла. Известно, что коэффициент теплопроводности воды в зависимости от условий (температуры и давления) в 10–30 раз больше, чем коэффициент теплопроводности водяного пара. Соответственно, и скорость охлаждения расплава увеличивается пропорционально росту коэффициента теплопроводности. Также установлено, что скорость кристаллизации зависит от других факторов, влияющих на интенсивность теплоотвода, и, соответственно, зависит от градиента температур между температурой кристаллизующего расплава и температурой охлаждающей жидкости. На основе специально разработанной промышленной установки для получения гранул из алюминиевых сплавов центрифугированием при сверхвысоких скоростях вращения тигля-разбрызгивателя удалось создать требуемую первоначальную скорость движения капли расплава в охлаждающей среде, гарантированно обеспечивающую удаление паровой оболочки. Экспериментальные исследования проводились на гранулированных материалах из сплавов систем Д1 и Д16. Результаты проведенных экспериментов подтвердили теоретические предположения. Полученные прессованные полуфабрикаты из гранул алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg, закристаллизованных со сверхвысокими скоростями охлаждения, характеризуются значительным повышением прочностных характеристик гранулированных материалов.

**Ключевые слова:** гранулированные материалы, гранулы, методы получения гранул, сбив паровой оболочки, увеличение скорости теплоотвода, теплопроводность воды, теплопроводность водяного пара, алюминиевые сплавы, сплавы системы Al–Cu–Mg, кристаллизация объекта, скорость кристаллизации, капля расплава, прессование гранулированных материалов, коэффициент вытяжки, термическая обработка.

**M.V. Zharov**

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF GRANULE CRYSTALLIZATION RATES  
ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF PRESSED SEMI-FINISHED  
ALUMINUM ALLOYS OF THE Al–Cu–Mg SYSTEM**

The article analyzes the mechanisms of intensification of heat removal from crystallized granules of metallic materials in the production of granules on an industrial scale. It is known that technologies using high crystallization rates provide a significant strengthening effect of granular material from alloying aluminum alloys with refractory components insoluble in aluminum or having very low solubility (zirconium, chromium, iron,

manganese). This makes it possible to create new granular aluminum alloys of increased strength based on the traditional systems Al–Cu–Mg, Al–Zn–Mg–Cu, Al–Mg with alloying with refractory elements in much larger quantities than is used for existing alloys. One of the main factors influencing the formation of supersaturated solid solutions and the formation of the submicroscopic structure of the material is the crystallization rate, which in turn is determined by the rate of heat removal from the formed granule. It has been established that a «steam jacket» is formed around the granule entering the cooling medium, namely a thin layer of steam arising from the transition of the cooling liquid (as a rule, industrial water) in contact with the hot or molten metal into a vaporous state. The formed «steam jacket» is a barrier against the intense heat removal from the cooled pellet. A technology is proposed for intensification of heat removal from crystallized granules of aluminum alloys of the Al–Cu–Mg system in order to increase the crystallization rate. The method is based on the technology of removing the «steam jacket» that inevitably arises around the crystallized melt droplet when the latter enters the water cooling medium. Knocking down the steam shell is possible when the speed of movement of the crystallized object in the water cooling medium increases. Accordingly, in the absence of a vapor shell around the crystallized drop, the thermal conductivity coefficient of the cooling medium increases significantly and the intensity of heat removal increases. It is known that the coefficient of thermal conductivity of water, depending on conditions (temperature and pressure), is 10–30 times greater than the coefficient of thermal conductivity of water vapor. Accordingly, the cooling rate of the melt increases in proportion to the growth of the thermal conductivity coefficient. It was also found that the rate of crystallization depends on other factors affecting the intensity of heat removal and, accordingly, depends on the temperature gradient between the temperature of the crystallized melt and the temperature of the cooling liquid. On the basis of a specially developed industrial installation for the production of granules from aluminum alloys by centrifugation at ultrahigh speeds of rotation of the crucible-sprinkler, it was possible to create the required initial velocity of the melt droplet in the cooling medium, which ensures the removal of the vapor shell. Experimental studies were carried out on granular materials from 2017 and 2024 aluminum alloys. The results of the experiments carried out confirmed the theoretical assumptions. The obtained pressed semifinished products from granules of aluminum alloys of the Al–Cu–Mg system, crystallized at ultra-high cooling rates, are characterized by a significant increase in the strength characteristics of granular materials.

**Keywords:** granular materials, granules, methods for producing granules, knocking down steam shells, increasing the rate of heat removal, thermal conductivity of water, thermal conductivity of water vapor, aluminum alloys, alloys of the Al–Cu–Mg system, crystallization of an object, crystallization rate, a drop of melt, pressing of granular materials, elongation ratio, heat treatment.

## Введение

В настоящее время традиционная технология легирования, используемая при производстве промышленных алюминиевых сплавов, практически исчерпала свои возможности в области увеличения прочностных характеристик материалов. В связи с этим определенное внимание в области повышения прочностных характеристик промышленных алюминиевых сплавов уделяется технологии гранулирования. Методы получения изделий и полуфабрикатов гранулированием на первых стадиях своего развития относились к порошковой металлургии. Однако с начала 80-х гг. прошлого века технология гранулирования уже выделилась в отдельное направление [1, 2]. При определении существенных отличий металлургии гранул от порошковой металлургии можно выделить следующие:

1. В порошковой металлургии элементарные металлические частицы (гранулы, чешуйки, порошинки) получают любым способом – не только разбрызгиванием или распылением расплава, но и механическим истиранием или дроблением слитков, дроблением стружки. Известно, что основной упрочняющий эффект при производстве алюминиевых сплавов гранулированием вносит явление пересыщения твердого раствора легирующими элементами в объемах, больших их предельной растворимости в жидкой фазе. Использование механического истирания или дробления слитков промышленных алюминиевых сплавов сводит к минимуму влияние этого явления. В металлургии гранул элементарные частицы получают исключительно разбрызгиванием или распылением сплава определенного состава, спиннингованием расплава с последующим резким охлаждением.

2. Довольно часто в порошковой металлургии применяют смешение частиц разнородных металлов и сплавов с целью получения материала с заданной композицией. В металлургии гранул в основном используются частицы одного и того же химического состава [1]. Однако в последнее время проводится большое количество исследований в области создания композиционных материалов именно из гранул различных материалов; получает развитие способ конструирования гранулированных композитов, заключающийся в формировании комбинации гранул различного химического, фазового и фракционного состава в необходимых пропорциях с целью создания гранулированных композитов с заранее заданными свойствами [3, 4].

3. В отличие от порошковой металлургии, в которой компактирование осуществляется спеканием, обеспечивающим плотность до 95 % от теоретической плотности монолитного материала, в металлургии гранул компактирование осуществляется всесторонним сжатием под высоким давлением до плотности не менее 99,9 % от теоретической [1].

## Теоретические исследования и постановка задачи

Применение способов получения полуфабрикатов и изделий гранулированием промышленных алюминиевых сплавов доказало свою эффективность. Применение данных методов производства полуфабрикатов позволяет увеличить содержание легирующих элементов сплавов выше предела их растворимости при температуре нагрева под закалку. При нагреве под закалку в твердый раствор всегда будет переходить максимальное количество легирующих элементов. Частицы фазы, выделив-

шиеся в результате распада пересыщенного твердого раствора при горячей деформационной обработке, являются достаточно мелкими и равномерно распределяются в объеме металла, что не приводит к снижению его прочностных и пластических свойств. В то же время эти частицы обеспечивают необходимый запас легирующих элементов для полного насыщения твердого раствора [5].

Другим фактором, влияющим на повышение прочностных свойств гранулированных материалов из алюминиевых сплавов, является тонкая измельченная структура, формирование которой вызвано высокой скоростью кристаллизации. Здесь наблюдается четкая зависимость: чем выше скорость отвода тепла от гранулы, тем выше скорость кристаллизации и тем более высокими прочностными характеристиками будет характеризоваться получаемый гранулируемый материал. Доказано, что сверхвысокие скорости кристаллизации могут привести даже к образованию аморфной структуры. В частности, утверждается, что первоначально поверхностный слой гранул карбида вольфрама с содержанием углерода 3,8 мас. %, с температурой плавления порядка 2550 °C затвердевал при высокой скорости кристаллизации порядка  $10^5$ – $10^6$  °C/c в виде аморфной структуры, а затем распадался на фазы. При этом центральные области гранулы, кристаллизовавшиеся с меньшей скоростью – порядка  $10^3$ – $10^4$  °C/c, не проявляли признаков аморфизации – в них образовывались зерна и начинала появляться микроусадочная пористость [4]. О возможности появления аморфной структуры при сверхвысоких скоростях кристаллизации говорят и самые авторитетные исследователи металлургии гранул [1]. Безусловно, наличие аморфной структуры в образцах гранулированных алюминиевых сплавов невозможно, так как в этом случае произойдет полная рекристаллизация структуры уже при комнатной температуре, но применительно к тугоплавким металлам это положение открывает новые перспективы для исследований.

На данном этапе необходимо конкретизировать применяемый показатель интенсивности кристаллизации. При реализации процессов кристаллизации слитков или гранул в качестве показателей интенсивности перехода в твердую фазу используют показатели линейной скорости кристаллизации  $v_{\text{лин}}$  (см/с) и объемную скорость кристаллизации  $v_{\text{об}}$  (1/с). Линейную скорость кристаллизации чаще применяют при описании процесса кристаллизации слитков. Ее физический смысл определяется как глубина слитка, закристаллизовавшаяся в единицу времени. В случае кристаллизации слитков объемная скорость кристаллизации прямо пропорциональна линейной скорости кристаллизации.

Объемную скорость кристаллизации  $v_{\text{об}}$  определить сложнее, поэтому пользуются пропорциональной ей величиной скорости охлаждения  $v_{\text{охл}}$  (°C/c). В табл. 1 представлено соотношение значений скорости кристаллизации и скорости охлаждения.

Понятно, что скорость кристаллизации и охлаждения чешуек зависит от их толщины: чем меньше частица металла, тем выше интенсивность отвода тепла от единицы ее массы и тем выше ее скорость кристаллизации. Полагают, что при получении чешуек из алюминиевых сплавов (при средней толщине 50–100 мкм) существует возможность достичь скорости охлаждения  $10^5$ – $10^6$  °C/c, а для тонких чешуек – до  $10^8$  °C/c [1].

Таблица 1

Приближенные значения скорости кристаллизации и охлаждения гранулированных объектов [1]

Характеристика объекта, скорость охлаждения	$v_{\text{лин}}$ , см/с	$v_{\text{об}}$ , 1/с	$v_{\text{охл}}$ , °C/c	Время кристаллизации объекта $\tau_{\text{кр}}$ , с
Слиток диаметром 1000 мм, получаемый методом непрерывного литья	0,05	1	0,02	50
Слиток диаметром 100 мм, получаемый методом непрерывного литья	0,4	50	1	1
Проволока диаметром 6 мм	10	$5 \times 10^2$	10	0,1
Гранулы диаметром 1–4 мм, охлаждение водой	–	$5 \times 10^3$	100	0,01
Гранулы диаметром 500 мкм, охлаждение водой	–	$5 \times 10^4$	1000	0,001
Гранулы диаметром 500 мкм, охлаждение на воздухе	–	$5 \times 10^2$	10	0,1
Гранулы диаметром 50 мкм, охлаждение на воздухе	–	$5 \times 10^3$	100	0,01
Чешуйки толщиной 50–100 мкм, охлаждение в воде	–	$5 \times 10^5$	10 000	0,0001
Чешуйки толщиной менее 50 мкм, охлаждение в воде	–	$5 \times 10^6$	20 000	0,000 05

По сравнению с гранулированием технология получения чешуек позволяет значительно повысить скорость охлаждения (примерно на два порядка). Вместе с тем эта технология имеет и серьезные недостатки по сравнению с методом гранулирования: неоднородность структуры, низкая производительность процесса, малая насыпная масса чешуек и связанные с этим трудности брикетирования. По-видимому, метод чешуек целесообразно применять

в том случае, когда гранулирование не обеспечивает для данного сплава необходимых параметров [1].

За рубежом развита технология получения сферических гранул методом распыления струи расплава высокоскоростным потоком инертного газа. Главным недостатком этого метода является захват инертного газа в центр сферической гранулы и большое количество несферических частиц [4]. Струя расплава под воздействием высокоскоростного газового потока дробится сначала на пленки, а затем пленка расплава под действием сил поверхностного натяжения захлопывается и при формировании капли происходит захват инертного газа внутрь частицы. Пузырек внутри частицы является концентратором напряжения. Сокращению внутренней пористости способствует уменьшение диаметра получаемых сферических гранул [4].

В отечественной промышленности широкое распространение получили вибрационный метод литья гранул [5, 6] и метод центрифугования расплава [7]. За счет влияния скорости движения охлаждаемой капли расплава в охлаждающей среде скорости кристаллизации при центрифуговании расплава оказываются гораздо выше скоростей кристаллизации при вибрационных методах, где капля расплава свободно падает в охлаждающую среду [5].

Определенное влияние на процесс получения гранул оказывает скорость вращения разбрызгивателя (например, тигля с расплавом) при центрифуговании расплава. Известен метод получения гранул из жаропрочных никелевых сплавов при сверхвысоких скоростях вращения разбрызгивателя (или распыляемой заготовки) [8]. При этом способе гранулы получают центробежным плазменным распылением вращающейся заготовки со скоростью вращения, определяемой по формуле

$$n = 2,15 \cdot 10^6(x_1 + x_2), \quad (1)$$

где  $n$  – число оборотов заготовки, об/мин;  $x_1$  – минимальный размер гранул годной фракции, мкм;  $x_2$  – максимальный размер гранул годной фракции, мкм.

Утверждается, что данный способ позволяет получить требуемую массу гранул заданного фракционного состава из предельно минимальной массы исходных гранул, что приводит к экономии металла при получении изделия [8]. Данное утверждение абсолютно справедливо, так как известно, что значительное увеличение скорости вращения тигля-разбрызгивателя позволяет получать более равномерный фракционный состав получаемых гранул [7].

Анализируя исследуемый способ получения гранул [8] и учитывая минимальный размер получа-

емых гранул (~(30–50) мкм) при подстановке данных размерных характеристик в формулу (1), можно получить огромную скорость вращения заготовки  $n = 2,15 \cdot 10^6(30 + 50) = 172 \cdot 10^6$  об/мин. Применение данных скоростей вращения при производстве гранул в промышленных масштабах вызывает определенные технические трудности. Однако применение данного метода позволяет значительно увеличивать первоначальную скорость движения капле расплава (кристаллизуемых гранул), не только ускоряя их доставку к охлаждающей жидкости, но и увеличивая скорость движения в среде, отводящей тепло.

Среди других способов исследования в области увеличения скорости отвода тепла от кристаллизуемого объекта можно выделить следующие:

1. Использование различных вспомогательных приспособлений, необходимых для закручивания охлаждающей жидкости (специальных завихрителей). Наличие поточного движения охлаждающей жидкости не только может привести к частичному сбиву «паровой рубашки», но и подводит к затвердевающей капле новые ненагретые объемы воды, снижая при этом градиент перепада температур между охлаждающей жидкостью и кристаллизуемым металлом на 70–80 °С, что, в свою очередь, способствует отводу тепла от расплава [1, 5].

2. Использование в качестве охлаждающей среды водных растворов веществ, повышающих теплоту парообразования воды. В качестве таких веществ использовались 5–10%-ные водные растворы хлоридов щелочных металлов (например, NaCl) и гидридов окислов щелочных металлов [5, 9–13].

3. Использование в качестве охлаждающих жидкостей криогенных сред. Однако очевидно, что данный метод повышения скорости кристаллизации металлов за счет ускорения отвода тепла можно считать экзотическим и пригодным только для исследовательских целей. Промышленное применение такого метода сопряжено с целым рядом проблем и сложностей.

4. Значительное уменьшение размеров кристаллизуемых гранул. Однако значительное уменьшение размеров кристаллизуемых гранул до размеров порошков сопряжено с определенными технологическими трудностями. Получить фракцию (скорее порошок, чем гранулу) размером менее 0,01 мм из расплавленного металла вибрационным методом, капельным способом, центрифугованием расплава невозможно [1, 5].

Получение заданного размера гранулы возможно только методом распыления, но при этом первоначальное охлаждение (в первые моменты

движения фракции, оторванной от расплава) неизбежно будет происходить в воздушной среде, что неизменно скажется на скорости отвода тепла от кристаллизуемой порошинки.

Таким образом, постановку задачи исследования можно охарактеризовать как необходимость анализа основных способов промышленного получения гранул на предмет возможности дальнейшего увеличения скоростей охлаждения, разработку способов промышленного гранулирования, обеспечивающих сверхвысокие скорости кристаллизации капель расплава, в том числе высокопрочных алюминиевых сплавов.

### Материалы и методика проведения экспериментов

Одним из перспективных направлений повышения качества металлов и сплавов является гранулирование, основанное на применении высоких скоростей кристаллизации расплава материала [1, 5].

Сущность влияния скорости кристаллизации на структуру и свойства многокомпонентных сплавов сводится к созданию тонкого внутреннего строения зерна. Если для алюминия и низколегированных сплавов на его основе решающее влияние на свойства оказывает величина зерна, то для высоколегированных алюминиевых сплавов свойства в литом состоянии определяются главным образом размерами ветвей дендритов и степенью развития дендритной пористости. Увеличение скорости охлаждения жидкой фазы до начала кристаллизации и скорости самого процесса кристаллизации способствует измельчению внутреннего зерна металла за счет уменьшения толщины отдельных ветвей дендрита и увеличения числа этих ветвей [5]. С изменением внутреннего строения неизбежно измельчаются и более равномерно располагаются включения вторых фаз и внутренние микропоры, результатом чего является заметное повышение механических свойств материала. Исходя из возможности получения высокой скорости кристаллизации, простоты устройств и технологии производства, широкое распространение нашел центробежный способ литья гранул.

Способ заключается в том, что внутрь вращающегося тигля-разбрызгивателя заливают расплавленный металл, который под действием центробежных сил разбивается на капли, которые выбрасываются через отверстия в цилиндрических стенках тигля в охлаждающую жидкость (воду) [5].

Важно, что при данном способе отливки гранул охлаждение капель, осуществляющееся в воде, обеспечивает достижение весьма высокой скорости охлаждения капель расплава, которая для гранул

диаметром 1,0 мм составляет до  $10^6$  °C/с. Применительно к сплавам системы Al–Cu–Mg структура гранул, получаемых данным способом, резко измельчена по сравнению со структурой слитка того же состава.

Проведены эксперименты по повышению скорости кристаллизации гранул совместным действием завихрений водных потоков и охлаждением в водных растворах веществ, повышающих теплоту парообразования воды. В качестве таких веществ использовались 5–10%-ные водные растворы хлоридов щелочных металлов (NaCl) и гидридов окислов щелочных металлов. Переход ламинарного движения потока охлаждающей жидкости в турбулентное производился с помощью завихрителей. Проведенные эксперименты показали наибольшую эффективность данных воздействий с точки зрения повышения скорости кристаллизации гранул.

Получение гранул сплавов системы Al–Cu–Mg проводили центробежным способом на специально изготовленной лабораторной установке [14]. Принципиальная схема установки представлена на рисунке. Установка для центробежного разбрызгивания гранул состоит из корпуса 1, одновременно являющегося корпусом закалочного бака, внутрь которого поступает охлаждающая жидкость (техническая вода) 2. В центральной части закалочного бака находится внешний вращающийся кожух 3 и внутренний вращающийся тигель 4, в который через отверстие в верхней части поступает расплав металла 5. Вращение внешнего вращающегося кожуха 3 и внутреннего вращающегося тигля 4 синхронизировано. Расплавленный металл за счет центробежных сил выдавливается в отверстия внутреннего тигля и, пролетая через отверстия внешнего подвижного кожуха, попадает в закалочную среду [14].

Известно, что при скорости вращения тела, погруженного в воду, более 6000 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 кожуха-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.

Охлаждаясь в воде, гранулы опускаются на дно внешнего корпуса и вместе с технической водой выгружаются через патрубок 6 в донной части устройства. Электродвигатель 8 через систему валов и муфт 7 обеспечивает вращательное движение

внешнего кожуха-стакана 3 и внутреннего перфорированного тигля 4 с заданной скоростью.

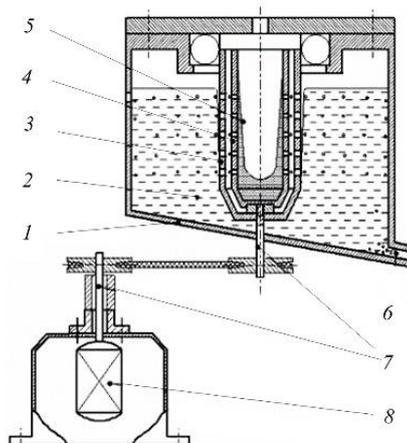


Рис. Принципиальная схема установки для получения гранул со сверхвысокими скоростями кристаллизации [14]

Важным является тот факт, что скорость вращения тигля с расплавленным металлом, которая задает требуемую поступательную скорость движения капель, обеспечивает сбив «паровой рубашки» вокруг кристаллизирующейся гранулы [14, 15].

Промывка и рассеивание гранул по фракциям проводилась по традиционным для порошковой металлургии методикам. Однако при сушке гранул применялась сушка горячим потоком воздуха на вибрационном сушильном транспортере. Это проводилось с целью уменьшить степень окисления поверхности гранул за счет наличия паров воды при медленном высыхании.

Гранулы имели однородный гранулометрический состав и диаметр около 1 мм. Выход годного при литье гранул составил около 90 %. Расчетным путем установили скорость охлаждения гранул при данном способе кристаллизации. Полученные гранулы в дальнейшем готовили к обработке давлением. Нагрев проводили до температуры 420 °С, время нагрева  $\tau$  составляло 8 ч. Далее гранулы подвергались горячему прессованию с получением прутка, профиля. Прессование проводили в лабораторной оснастке на гидравлическом прессе усилием 6000 кН с коэффициентами вытяжки  $\lambda$ , равными 20–30. Закалку изделий проводили с температуры 480–500 °С и с последующим искусственным старением при температуре 190 °С в течение 8 ч.

### Результаты исследований и их обсуждение

Проведенные исследования структуры и механических свойств полученных гранулированных материалов подтвердили теоретические предполо-

жения. Определено значительное повышение механических свойств сплавов при увеличении скорости кристаллизации гранул.

Установлено, что основным препятствием на пути увеличения скорости кристаллизации гранулы диаметром около 1,0 мм является формирование «паровой рубашки», образующейся за счет передачи тепла от кристаллизующегося объекта пограничным слоям охлаждающей жидкости. Как только температура близлежащих слоев воды превысит температуру кипения, образуется паровая оболочка. За счет низкой теплопроводности пара отвод тепла от охлаждаемой гранулы резко замедляется.

Экспериментально установлено, что для удаления (сбива) паровой рубашки требуется, чтобы первоначальная скорость движения капли расплава в момент ее входа в охлаждающую жидкость была достаточно высокой. Первоначальная скорость движения гранулы определяется на основании недостаточности времени для передачи требуемого количества теплоты, необходимого для превращения близлежащих слоев воды в пар в объеме, не превышающем 1 % от объема гранулы.

Таким образом, скорость первоначального движения капли в расплаве зависит от физических свойств расплава металла, геометрических параметров тигля и параметров охлаждающей жидкости. В частности, теоретически определено и экспериментально доказано, что необходимая первоначальная скорость движения капли прямо пропорционально зависит от радиуса капли, плотности расплава металла, коэффициента теплоотдачи капли охлаждающей среде, градиента температур (разницы температуры кристаллизующейся капли и температуры охлаждающей жидкости) и обратно пропорционально зависит от массы капли расплава (гранулы), объемной массы паровой среды, удельной теплоты парообразования охлаждающей среды, удельной теплоемкости охлаждающей среды и градиента температур между температурой парообразования охлаждающей среды и ее рабочей температурой.

При выявленной начальной скорости движения гранул расчетная скорость охлаждения гранул достигает скоростей охлаждения чешуек, имеющих гораздо меньшую толщину, чем гранулы. Известны скорости кристаллизации чешуек (плоских небольших пластин неправильной формы и малой толщины) до  $10^8$  °С/с при их кристаллизации на медных подложках (медных плитах) [1, 16, 17]. Однако за счет их маленькой толщины довольно сложно проводить дальнейшее брикетирование и прессование

полуфабрикатов из полученных чешуек. Это является серьезным препятствием на пути промышленного использования формования пресс-изделия из чешуек. Установлено, что при разбрызгивании расплава можно в определенных пределах регулировать величину частиц. В случае распыления и охлаждения расплава газом скорость охлаждения при одинаковых размерах частиц меньше, чем при центробежном разбрызгивании в воду. Однако метод распыления позволяет получать частицы меньших размеров и за счет этого приблизиться к скоростям охлаждения, достигаемым при центробежном разбрызгивании расплава в воду. Однако при промышленном использовании этой технологии возникает та же проблема, что и при брикетировании, прессовании полуфабрикатов из чешуек.

Таким образом, предлагаемая технология получения гранул алюминиевых сплавов центрофугованием расплава с использованием явления сбива «паровой рубашки» является единственной технологией гранулирования, которая обеспечивает заданный размер гранул с высокой скоростью их кристаллизации и дает возможность ее промышленного применения.

Таблица 2

Механические свойства прессованных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg, полученных по разным технологиям

Сплав	Технология получения	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Источник
Д16	Прессование из слитка (1)	450	400	16	[16, 18, 19]
Д16	Прессование из гранул (2)	559–566	419–436	13,9–15,7	[1, 4, 20]
Д16	Прессование из гранул (3)	620–625	460–468	9,1–10,5	Получен. данные
Д1	Прессование из слитка (1)	410	250	15	[16, 18, 19]
Д1	Прессование из гранул (2)	546	355	17,5	[1, 4]
Д1	Прессование из гранул (3)	582–584	390–398	11,4–12,8	Получен. данные

Применительно к сплавам системы Al–Cu–Mg установлено увеличение прочностных свойств прутковых полуфабрикатов, полученных с применением предлагаемой технологии гранулирования. В табл. 2 представлены механические свойства сплавов Д1 и Д16 в состоянии поставки Т1 (закаленные и искусственно состаренные) из прессованных образцов, полученных по традиционной технологии прессования прутка из слитка (1); прессования из гранул, полученных без сбива «паровой рубашки» при кристаллизации гранул (2); и по предлагаемой технологии (3).

### Заключение

В результате проведенных исследований определена наибольшая эффективность явления сбива «паровой рубашки» при охлаждении капли расплава в водной среде с точки зрения повышения скорости кристаллизации гранул алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg.

Предлагаемая технология позволяет получать качественные гранулы из алюминиевых сплавов Д1, Д16, которые в дальнейшем используются в качестве сырьевого полуфабриката при изготовлении деталей прессованием, горячей объемной штамповкой или спеканием (после обязательного предварительного брикетирования).

На основании теоретических и экспериментальных исследований можно оценить перспективность разрабатываемой технологии. Проведенный технико-экономический анализ показал, что при крайне незначительном удорожании себестоимости изготовления полуфабрикатов и изделий из сплавов системы Al–Cu–Mg возможно увлечение прочностных характеристик прессованных гранулированных материалов на 15–18 % применительно к ранее рассмотренным алюминиевым сплавам.

### Список литературы

- Добаткин В.И., Елагин В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
- Добаткин В.И. Слитки алюминиевых сплавов. – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 176 с.
- Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. – М.: Мир, 1967. – 159 с.
- Москвичев Ю.П., Панин В.И., Агеев С.В. Гранульные композиты и эффективность их применения [Электронный ресурс] // Титан в атомной промышленности: материалы 2-й отрасл. конф., г. Чепецк, 12–13 марта 2014 г. / АО «Чепецкий металлургический завод». – URL: <http://www.chmz.net/press/news-chmz/files/2014-04-15/13/7.pdf>. (дата обращения: 23.07.2020).
- Колпашников А.И., Ефремов А.В. Гранулированные материалы. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.

6. Способ получения сферических гранул: пат. 2032498, Рос. Федерация / Анкудинов В.Б., Марухин Ю.А. – Оpubл. 10.04.1995. – 3 с.

7. Устройство для центробежной грануляции расплава: а. с. 403445, Рос. Федерация / Колпашников А.И., Ефремов А.В., Силин М.Б. – Оpubл. 26.10.1973, Бюл. № 3. – 2 с.

8. Способ получения изделий из гранул жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2308354С1, Рос. Федерация / Романов А.И., Гарибов Г.С., Кошелев В.И. [и др.]; патентообл. АО «Всероссийский институт легких сплавов» (АО «ВИЛС»). – Оpubл. 20.10.2007.

9. Перспективы развития и применения способа центробежного литья в области создания новых материалов на основе легких сплавов / А.П. Петров, В.В. Еремеев, Н.В. Еремеев, И.О. Краснобородько, И.М. Злыднев // Двигатель: науч.-техн. журн. – 2017. – № 4. – С. 4–8.

10. Никитин В.И., Никитин Н.В. Наследственность в литых сплавах. – М.: Машиностроение, 2005. – 476 с.

11. Ливанов В.А. Способ увеличения прочностных и пластических свойств слитков из алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. – 1995. – № 3. – С. 37–42.

12. Берман С.И., Залесский В.И., Иманов Х.И. Производство гранул из сплавов на основе алюминия и прессование из них полуфабрикатов. – М.: Цветметинформация, 1971. – 126 с.

13. Первов М.Л., Васильева А.В. Производство изделий из гранулированных алюминиевых сплавов: учеб. пособие. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2015. – 48 с.

14. Способ получения металлических гранул: пат. 2125923, Рос. Федерация / Силин М.Б., Жаров М.В. – Оpubл. 10.02.1999. – 4 с.

15. Устройство для получения металлических гранул: пат. 2117556, Рос. Федерация / Силин М.Б., Жаров М.В. – Оpubл. 20.08.1998. – 5 с.

16. Авиационные материалы: справ.: в 9 т. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Ч. 1. Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия. – М.: Изд-во ОНТИ ВИАМ, 1982. – Кн. 1. – 632 с.

17. Петров А.П., Еремеев В.В., Еремеев Н.В. Аспекты технологии получения кольцевых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов: науч.-техн. журн. – 2013. – № 3. – С. 7–11.

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

19. Промышленные алюминиевые сплавы / под ред. Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1972. – 552 с.

20. Алюминиевые сплавы. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ. рук-во / под ред. А.Ф. Белова, Ф.И. Квасова. – М.: Металлургия, 1971. – 496 с.

## References

1. Dobatkin V.I., Elagin V.I. Granuliruemye aliuminievye splavy [Granular aluminium alloys]. Moscow: Metallurgii, 1981, 176 p.

2. Dobatkin V.I. Slitki aliuminievykh splavov [Aluminum alloy ingots]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960, 176 p.

3. Vaingard U. Vvedenie v fiziku kristallizatsii metallov [Introduction to physics of metal crystallization]. Moscow: Mir, 1967, 159 p.

4. Moskvichev Iu.P., Panin V.I., Ageev S.V. Granul'nye kompozity i effektivnost' ikh primeneniia [Granular composites and efficiency of their application]. Titan v atomnoi promyshlennosti: materialy 2-i otraslevoi konferentsii, g. Chepetsk, 12–13 marta 2014. АО «Chepetskii metallurgicheskii zavod». URL: <http://www.chmz.net/press/news-chmz/files/2014-04-15/13/7.pdf>. (data obrashcheniia: 23.07.2020).

5. Kolpashnikov A.I., Efremov A.V. Granulirovannye materialy [Granular Materials]. Moscow: Metallurgii, 1977, 240 p.

6. Sposob polucheniia sfericheskikh granul [The method of obtaining spherical granules]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2032498 (1995).

7. Kolpashnikov A.I., Efremov A.V., Silin M.B. Ustroistvo dlia tsentrobezhnoi granulatsii rasplava [The device for centrifugal melt granulation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 403445 (1973).

8. Romanov A.I., Garibov G.S., Koshelev V.I. et al. Sposob polucheniia izdelii iz granul zharoprochnykh nikelovykh splavov: (АО «VILS») [The method of obtaining products from granules of heat-resistant nickel alloys]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2308354C1 (2007).

9. Petrov A.P., Eremeev V.V., Eremeev N.V., Краснобород'ко I.O., Zlydnev I.M. Perspektivy razvitiia i primeneniia sposoba tsentrobezhnogo lit'ia v oblasti sozdaniia novykh materialov na osnove legkikh splavov [Prospects of development and application of centrifugal casting method in the field of creation of new materials based on light alloys]. Dvigatel': nauchno-tehnicheskii zhurnal, 2017, no. 4, pp. 4–8.

10. Nikitin V.I., Nikitin N.V. Nasledstvennost' v litykh splavakh [Inheritance in Cast Alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 476 p.

11. Livanov V.A. Sposob uvelicheniia prochnostnykh i plasticheskikh svoistv slitkov iz aliuminievykh splavov [Way to increase strength and plastic properties of aluminum alloy ingots]. Tekhnologiya legkikh splavov, 1995, no. 3, pp. 37–42.

12. Berman S.I., Zaleskii V.I., Imanov Kh.I. Proizvodstvo granul iz splavov na osnove aliuminiia i pressovanie iz nikh polufabrikatov [Production of pellets from aluminum-based alloys and pressing of semi-finished products from them]. Moscow: Tsvetmetinformatsiia, 1971, 126 p.

13. Pervov M.L., Vasil'eva A.V. Proizvodstvo izdelii iz granulirovannykh aliuminievykh splavov: uchebnoe Posobie [Manufacture of products from aluminum granular alloys]. Rybinsk: Izdatel'stvo RGATU imeni P.A. Solov'eva, 2015, 48 p.

14. Silin M.B., Zharov M.V. Sposob polucheniia metallicheskih granul [Method of obtaining metal granules]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2125923 (1999).

15. Silin M.B., Zharov M.V. Ustroistvo dlia polucheniia metallicheskih gra-nul [The device for reception of metal granules]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2117556 (1998).

16. Aviatsionnye materialy [Aircraft materials]. Aliuminievye i berillievye splavy. Ch. 1. Deformiruemye aliuminievye splavy i splavy na osnove berilliia. Moscow: Izdatel'stvo ONTI VIAM, 1982, 632 p.

17. Petrov A.P., Ereemeev V.V., Ereemeev N.V. Aspekty tekhnologii polucheniia kol'tsevykh polufabrikatov iz aliuminievykh splavov [Aspects of technology for producing semi-finished ring aluminum alloys]. *Tekhnologiya legkikh splavov: nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2013, no. 3, pp. 7–11.

18. Kovka i shtampovka: sprav.: v 4 t. T. 1. Materialy i nagrev. Oborudovanie. [Forging and stamping]. Kovka. Ed. E.I. Semenova. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 568 p.

19. Promyshlennye aliuminievye splavy [Industrial Aluminum Alloys]. Ed. F.I. Kvasova, I.N. Fridliandera. Moscow: Metallurgiiia, 1972, 552 p.

20. Aliuminievye splavy. Proizvodstvo polufabrikatov iz aliuminievykh splavov [Aluminum alloys. Manufacture of semi-finished products from aluminum alloys]. Ed. A.F. Belova, F.I. Kvasova. Moscow: Metallurgiiia, 1971, 496 p.

Получено 30.05.2020

Опубликовано 12.10.1010

#### Сведения об авторе

**Жаров Максим Владимирович** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), e-mail: MaximZharov@mail.ru.

#### About the author

**Maxim V. Zharov** (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), e-mail: MaximZharov@mail.ru.