

# Влияние нестационарного силового поля на параметры кристаллизации алюминия

Е. В. Симонова, С. И. Герцык, Ж. В. Еремеева,  
В. Ю. Лопатин, Ю. Ю. Капланский

---

Изучено влияние режимов центрифугирования на процесс кристаллизации расплава. Определены параметры кристаллизации (давление, температура, время) чистого алюминия в силовом поле центрифуги. Описан эффект снижения температуры кристаллизации расплава при наложении давления, рассчитаны значения температуры кристаллизации алюминия при применяемых скоростях вращения ротора. Для оценки времени, необходимого для кристаллизации алюминиевой кольцевой отливки при наложении давления на ее поверхность, составлен тепловой баланс кристаллизатора. По результатам баланса тепла оценено время, необходимое для затвердевания той же отливки, кристаллизующейся в стационарных условиях без наложения давления. Результаты расчетов свидетельствуют о снижении времени, необходимого для кристаллизации алюминиевой кольцевой отливки с увеличением приложенного давления.

**Ключевые слова:** центрифуга, давление, отливка, тепловой баланс, температура кристаллизации, время кристаллизации

---

## Введение

Современная промышленность непрерывно требует разработки новых и модифицирования уже известных материалов с целью улучшения прочностных свойств и снижения затрат на производство. Данные требования распространяются в том числе и на литейные технологии. Структура и свойства литого материала во многом определяется режимом кристаллизации, который можно регулировать в относительно широких пределах. При разработке новых материалов особое внимание уделяют процессам, связанным с силовым воздействием на процессы кристаллизации металла, в том числе литью под давлением, литью с наложением вибрации, ультразвука и т.д.

Силовое воздействие в виде давления, прикладываемого к кристаллизующемуся расплаву, оказывает серьезное влияние на значение основных теплофизических параметров жидкости: температуру плавления, коэффициент теплопроводности, удельную теплоемкость, скрытую теплоту кристаллизации, поверхностное натяжение, плотность, вязкость и др., что позволяет модифицировать литые металлы и

металломатричные композиционные материалы с целью улучшения их механических и эксплуатационных свойств.

Цель работы — изучение влияния режимов центрифугирования на параметры кристаллизации расплава алюминия.

## Оборудование и методика

В качестве способа приложения нагрузки использовали лабораторную центрифугу с вертикальной осью, на которой закреплён вращающийся ротор с изложницей. Корпус изложницы выполнен из конструкционной среднеуглеродистой стали толщиной 5 мм, на дно корпуса установлена втулка-тигель, обеспечивающая необходимые внутренние размеры отливки. Втулка выполнена из графитизированного углерода марки МПГ-5. Изложница может закрываться крышкой из конструкционной стали. Под воздействием центробежных сил образуется кольцевая отливка. Схема изложницы с отливкой приведена на рис. 1.

Ротор приводится во вращение электродвигателем с регулируемой скоростью вращения.

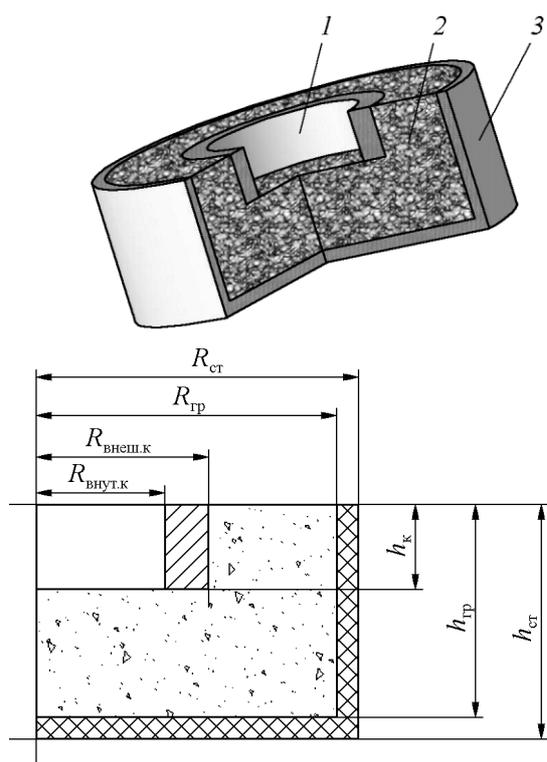


Рис. 1. Изложница с отливкой: 1 — алюминиевое кольцо; 2 — графитовый тигель; 3 — стальной корпус.

Расплав, перегретый относительно температуры кристаллизации на 50 °С, заливали в раскрученный до номинальных оборотов ротор через питатель в крышке изложницы. Центрифугирование проводили по трем режимам, при которых скорость вращения ротора составляла 18, 22 и 26 об./с, соответственно, время центрифугирования — 1 мин.

Размеры отливки и изложницы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры отливки и изложницы	
Внутренний радиус отливки, $R_{\text{внут.к}}$	0,068
Внешний радиус отливки, равный внутреннему радиусу графитовой втулки, $R_{\text{внеш.к}} = R_{\text{внут.гр}}$	0,076
Внешний радиус графитовой втулки, равный (внутреннему радиусу стального корпуса), $R_{\text{внеш.гр}} = R_{\text{внут.ст}}$	0,123
Внешний радиус стального корпуса, $R_{\text{внеш.ст}}$	0,128
Высота отливки, $h_{\text{к}}$	0,035
Толщина стенки графитовой втулки, $\delta_{\text{гр}} = R_{\text{внеш.гр}} - R_{\text{внут.гр}}$	0,047
Высота графитовой вставки, $h_{\text{гр}} = h_{\text{к}} + \delta_{\text{гр}}$	0,082
Толщина стенки изложницы, $\delta_{\text{ст}} = R_{\text{внеш.ст}} - R_{\text{внут.ст}}$	0,005
Высота стальной изложницы, $h_{\text{ст}} = h_{\text{к}} + \delta_{\text{гр}} + \delta_{\text{ст}}$	0,087

### Влияние параметров центрифугирования на температуру кристаллизации алюминия

Кристаллизующийся материал при вращении испытывает переменные в радиальном направлении нагрузки в зависимости от гравитационного коэффициента, значение которого определяется угловой скоростью ротора.

Давление, возникающее в расплаве, определяется как отношение центробежной силы к площади, к которой эта сила приложена [1, 2]:

$$P = \frac{F_{\text{ц}}}{S}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{ц}}$  — центробежная сила, возникающая в расплаве, Н;  $S$  — площадь алюминиевого кольца, к которой приложено давление, м<sup>2</sup>.

Величину центробежной силы можно вычислить по формуле:

$$F_{\text{ц}} = ma = m \frac{v^2}{R} = m \frac{(\omega R)^2}{R} = m(2\pi f)^2 R, \quad (2)$$

где  $m$  — масса алюминиевой отливки, кг;  $v$  — линейная скорость вращения, м/с;  $R$  — радиус отливки, м;  $\omega$  — угловая скорость вращения, рад./с;  $f$  — частота вращения, об./с.

Площадь, к которой приложено давление, определяется по формуле:

$$S = 2\pi R_{\text{внутр}} h_{\text{к}}. \quad (3)$$

Подставляя формулы (2) и (3) в формулу (1), получаем, что давление, возникающее в расплаве, зависит только от числа оборотов ротора и высоты алюминиевого кольца.

$$P = \frac{2\pi m f^2}{h_{\text{к}}}. \quad (4)$$

Значения давления для используемых режимов центрифугирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Давление, возникающее в расплаве при центрифугировании	
Скорость вращения ротора, об./с	Давление в расплаве, кПа
18	$P_1 = 20,05$
22	$P_2 = 30,08$
26	$P_3 = 40,11$

$P_1, P_2, P_3$  — давление при соответствующей скорости вращения ротора.

За счет приложения внешнего давления можно уменьшить объем кристаллизующегося металла. Очевидно, что уменьшение объема жидкого металла

при приложении к нему внешнего давления равносильно переводу его в другое тепловое состояние, отвечающее более низкой температуре [3].

Один из вариантов влияния давления на фазовое равновесие — изменение температур плавления металлов и сплавов. В [3] приведена зависимость температуры плавления алюминия от приложенного давления, которая имеет линейный вид.

По данным этой зависимости определена температура кристаллизации алюминия в центрифуге при указанных оборотах ротора. Для  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  температура кристаллизации ( $T_{кр}$ ) составила соответственно 673, 679 и 686 °С.

### Оценка времени кристаллизации алюминия

Для оценки времени, необходимого для кристаллизации алюминиевой кольцевой отливки при наложении давления на ее поверхность, составлен тепловой баланс кристаллизатора. По результатам баланса тепла оценено время, необходимое для затвердевания той же отливки, кристаллизующейся без приложения давления.

Поскольку в изложницу заливали перегретый (на 50 °С) расплав алюминия, то суммарное количество теплоты расплава  $Q_{\Sigma}$  складывается из следующих величин:

$$Q_{\Sigma} = \Delta I + Q_{кр}, \quad (5)$$

где  $\Delta I = cm\Delta T$  — изменение теплосодержания расплава при его охлаждении до температуры начала кристаллизации;  $c$  — удельная теплоемкость алюминия, Дж/(кг·К); скрытая теплота кристаллизации  $Q_{кр}$  равна:

$$Q_{кр} = q_k m, \quad (6)$$

где  $q_k$  — удельная теплота кристаллизации расплава, Дж/кг.

Охлаждение отливки происходит за счет потерь тепла внешней поверхностью изложницы и потерь тепла излучением торцевой поверхностью.

Потери тепла излучением  $Q_{изл}$  [Вт] оценивали по известной формуле [7]

$$Q_{изл} = c_0 \varepsilon \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{возд}}{100} \right)^4 \right] \cdot S_{изл}, \quad (7)$$

где  $c_0 = 5,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) — коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon$  — степень черноты излучающего тела;  $T$  — температура излучающего тела, К;  $T_{возд}$  — температура окружающей среды, К;  $S_{изл}$  — площадь излучающей поверхности, м<sup>2</sup>.

Потери тепла излучением рассчитывали для трех кольцевых поверхностей торца (алюминиевое кольцо, графитовое и стальное), имеющих различные значения степени черноты, температуры и внутренней поверхности отливки. В расчете использовали значения степени черноты, приведенные в табл. 3, и площади из табл. 1. Расчет выполнен для открытой (без крышки) поверхности изложницы.

Таблица 3

Основные характеристики алюминия и материалов изложницы

Удельная теплоемкость алюминия, $c$ , Дж/(кг·К)	1021
Скрытая теплота кристаллизации алюминия, $\lambda$ , кДж/кг	390
Степень черноты алюминия, $\varepsilon_{Al}$	0,19
Степень черноты графита, $\varepsilon_{гр}$	0,80
Степень черноты стали, $\varepsilon_{ст}$	0,79

С учетом конвективной составляющей теплообмена:

$$Q_{изл\Sigma} = 1,1 Q_{изл}. \quad (8)$$

Потери тепла через внешние поверхности изложницы складываются из потерь через цилиндрическую боковую стенку и ее дно:

$$Q_{тепл} = Q_{стен} + Q_d, \quad (9)$$

через боковую поверхность:

$$Q_{стен} = h_k \times$$

$$\times \frac{\pi (T_{пл} - T_{окр.сп})}{\frac{1}{2\lambda_{гр}} \ln \frac{R_{внеш.кр}}{R_{внутр.гр}} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{R_{внеш.ст}}{R_{внутр.ст}} + \frac{1}{\alpha_{ст} d_{внеш.ст}}}; \quad (10)$$

через дно:

$$Q_d = S_{внеш.ст} \frac{T_{пл} - T_{окр.сп}}{\frac{\delta_{гр}}{\lambda_{гр}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{ст}}}, \quad (11)$$

где  $\lambda_{гр}$ ,  $\lambda_{ст}$  — коэффициенты теплопроводности графита и стали, Вт/(м·К);  $\alpha_{ст}$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружной поверхности изложницы в окружающее пространство, принят равным 15 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Время кристаллизации оценивали как отношение теплосодержания перегретого расплава к величине потерь через стенки изложницы и излучением торцевых поверхностей и внутренней поверхности отливки:

$$\tau = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{изл\Sigma} + Q_{тепл}}. \quad (12)$$

Таблица 4

Температура графитового тигля и стальной изложницы

Температура кристаллизации алюминия, °С	Средняя температура графита, °С	Коэффициент теплопроводности графита, Вт/(м·К);	Температура стальной обечайки, °С	Коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К)
660	620	16,58	580	36,46
673	632	16,74	591	36,09
679	639	16,85	599	35,84
686	645	16,93	604	35,65

Таблица 5

Тепловые потери и время кристаллизации алюминия

Температура кристаллизации алюминия, °С	Теплосодержание расплава $Q_{\Sigma}$ , Дж	Потери тепла				Время, с
		излучением		теплопроводностью		
		$Q_{изл}$ , Вт	$Q_{изл,\Sigma}$ , Вт	$Q_{стен}$ , Вт	$Q_{д}$ , Вт	
660	150765	3738	4112	246	473	31,2
673	146311	4032	4436	251	482	28,3
679	144085	4211	4632	253	487	26,8
686	141858	4370	4807	256	492	25,5

### Измерения и вычисления

Масса кольцевой отливки из алюминия ( $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ ) с размерами, указанными в табл. 1, составила 342 г.

Основные теплофизические характеристики алюминия, графита и стали, необходимые для выполнения расчетов приведены в табл. 3 [4].

Значения коэффициентов теплопроводности в зависимости от средней температуры слоя равны [4]: для графитового тигля:

$$\lambda_{гр} = 7,9 + 0,014 t_{ср,гр},$$

где  $t_{ср,гр}$  — средняя температура слоя графита; для стальной изложницы:

$\lambda_{ст} = 37,1$  и  $34,2 \text{ Вт/(м·К)}$  при  $600$  и  $700 \text{ °С}$ , соответственно.

Температуру на внутренней поверхности графитового тигля принимали равной средней за период остывания отливки от температуры перегрева до температуры начала кристаллизации. Среднюю температуру слоя графита определяли методом последовательных приближений по методике [4]. Учитывая относительно небольшую толщину стальной изложницы, ее температуру принимали постоянной и равной температуре на внешней поверхности графита. Средняя температура слоев и значения коэффициентов теплопроводности стали и графита в зависимости от температуры кристаллизации алюминия представлены в табл. 4.

Оценка времени кристаллизации алюминия для различных режимов центрифугирования приведена в табл. 5.

Результаты расчетов показали, что время кристаллизации отливки уменьшается с увеличением гравитационного коэффициента (скорости вращения ротора).

В диапазоне скоростей вращения от 18 до 26 об./с (что соответствует давлению от 20,05 до 40,11 кПа) температура кристаллизации снизилась от 673 до 686 °С, а время кристаллизации сократилось от 31,2 с при кристаллизации в стационарных условиях до 25,5 с при максимальной скорости вращения ротора.

### Выводы

Определены параметры кристаллизации (давление, температура, время) чистого алюминия в силовом поле центрифуги.

Описан эффект снижения температуры кристаллизации расплава при наложении давления, рассчитаны значения температуры кристаллизации алюминия при применяемых скоростях вращения ротора.

Показано что, в диапазоне скоростей вращения от 18 до 26 об./с (что соответствует давлению от 20,05 до 40,11 кПа) температура кристаллизации снизилась от 673 до 686 °С, а время кристаллизации сократилось от 31,2 с при кристаллизации в стационарных условиях до 25,5 с при максимальной скорости вращения ротора.

### Литература

- 1 Шамиргон, С.А. Что такое центробежное литье. М.: Машгиз, 1959, 111 с.

- 2 Гусев С.С., Лобков Д.Н., Казачков С.С. Использование методов центробежного литья для получения изделий из композиционных материалов с упрочненной поверхностью. *Материаловедение*, 1999, № 5, с. 50 – 53.
- 3 Попов А.В. Процессы кристаллизации металлов и сплавов в искусственных нестационарных силовых полях. М.: ОАО «Русские сплавы», 2008, 207 с.
- 4 Мастрюков Б.С. Теория, конструкции и расчет металлургических печей. В 2-х т. Т. 2. Расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1986, 376 с.
- 2 Gusev S.S., Lobkov D.N., Kazachkov S.S. Ispolzovaniye metodov tsentrobezhnogo litya dlya polucheniya izdely iz kompozitsionnykh materialov s uprochnennoy poverkhnostyu. *Materialovedeniye* [Use of centrifugal casting for production of composite materials with reinforced surface]. *Materialovedenie — Materials science*, 1999, no. 5, pp. 50 – 53.
- 3 Popov A.V. Protsessy kristallizatsii metallov i splavov v iskusstvennykh nestatsionarnykh silovykh polyakh [Processes of metals and alloys crystallization in artificial unsteady force fields]. Moscow, JSC Russkiye splavy Publ., 2008, 207 с.
- 4 Mastryukov B.S. *Teoriya, konstruksii i raschet metallurgicheskikh pechey* [Theory, design and calculation of metallurgical furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., vol. 2, 1986, 376 p.

## References

- 1 Shamirgon S.A. *Chto takoye tsentrobezhnoye litye* [What is centrifugal casting]. Moscow, Mashgiz Publ., 1959, 111 p.

*Статья поступила в редакцию 31.03.2014 г.*

**Симонова Екатерина Васильевна** — Национальный исследовательский университет (НИТУ) “МИСиС” (г. Москва), ассистент кафедры, специалист в области порошковой металлургии и композиционных материалов. E-mail: [simonovaev13@gmail.com](mailto:simonovaev13@gmail.com).

**Герцык Светлана Исаковна** — Московский государственный машиностроительный университет МАМИ (г. Москва), кандидат технических наук, доцент, специалист в теплотехники металлургических процессов. E-mail: [gertsyk@mail.ru](mailto:gertsyk@mail.ru).

**Еремеева Жанна Владимировна** — НИТУ “МИСиС” (г. Москва), доктор технических наук, профессор, специалист в области порошковой металлургии и композиционных материалов. E-mail: [eremeeva-shanna@yandex.ru](mailto:eremeeva-shanna@yandex.ru).

**Лопатин Владимир Юрьевич** — НИТУ “МИСиС” (г. Москва), кандидат технических наук, доцент, специалист в области порошковой металлургии и композиционных материалов. E-mail: [lopatin63@mail.ru](mailto:lopatin63@mail.ru).

**Капланский Юрий Юрьевич** — НИТУ “МИСиС” (г. Москва), студент, специализируется в области порошковой металлургии и функциональных покрытий. E-mail: [ukaplansky@mail.ru](mailto:ukaplansky@mail.ru).

## **Influence of non-stationary force fields on crystallization parameters of aluminum**

**E. V. Simonova, S. I. Gertsyk, Zh. V. Eremeeva, V. Yu. Lopatin, Yu. Yu. Kaplansky**

Study of centrifugation parameters effect in the process of melt crystallization are presented. Parameters of crystallization (pressure, temperature, time) of pure aluminum in the force field of centrifuge are determined. Effect of melt crystallization temperature decrease under use of pressure was described; the values of aluminum crystallization temperature depending on applied speeds of rotation were calculated. To estimate the time required for the crystallization of aluminum ring castings under pressure imposition on its surface, the heat balance of the mould was made up. According to the results of heat balance, the time needed for curing the same casting, crystallized in stationary conditions without applying pressure is estimated. The results of calculations showed a decrease of time required for crystallization in pressure condition.

**Keywords:** centrifuge, pressure, casting, heat balance, crystallization temperature, time of crystallization

---

***Simonova Ekaterina** — National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, assistant. E-mail: [simonovaev13@gmail.com](mailto:simonovaev13@gmail.com)*

***Gertsyk Svetlana** — Moscow State engineering University MAMI, Moscow, PhD, associate professor. E-mail: [gertsyk@mail.ru](mailto:gertsyk@mail.ru)*

***Eremeeva Zhanna** — National University of Science and Technology “MISIS”, DrSci (Eng), professor. E-mail: [eremeeva-shanna@yandex.ru](mailto:eremeeva-shanna@yandex.ru)*

***Lopatin Vladimir** — National University of Science and Technology “MISIS”, PhD, associate professor. E-mail: [lopatin63@mail.ru](mailto:lopatin63@mail.ru)*

***Kaplansky Yury** — National University of Science and Technology “MISIS”, student. E-mail: [ykaplansky@mail.ru](mailto:ykaplansky@mail.ru)*