

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ РАСПЛАВОВ

© 2018 г. **К.Н. Вдовин, Г.А. Дубский, Л.Г. Егорова**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Статья поступила в редакцию 02.07.17 г., доработана 14.09.17 г., подписана в печать 02.12.17 г.

Для сознательного управления процессом кристаллизации металлов с целью получения заданной микроструктуры слитка используют различные физические поля, которые при воздействии на расплав изменяют его внутреннее состояние, а значит, и кинетику кристаллизации. В работе описаны термодинамика и кинетика процесса кристаллизации алюминия при обработке расплава магнитным полем. Создана достаточно простая экспериментальная установка, позволяющая изучать процессы воздействия магнитного поля на расплавы алюминия или других металлов и сплавов. Она состоит из нескольких основных узлов: (1) электропечи; (2) водоохлаждаемого медного кристаллизатора, совмещенного с электромагнитной катушкой; (3) механического устройства для быстрого перемещения тигля с расплавом алюминия; (4) системы контроля и управления температурой расплава; (5) электронной части для записи и обработки информации. Экспериментально установлено, что магнитное поле изменяет температуру фазового равновесия расплав–кристалл, скрытую теплоту фазового перехода и температуру переохлаждения расплава при кристаллизации. Показано, что изменение этих параметров приводит к уменьшению радиуса критических зародышей и увеличению скорости их зарождения. Получены температурно-временные зависимости процесса кристаллизации. Выявлено, что при обработке расплава алюминия магнитным полем время кристаллизации уменьшается. Анализ алюминиевых образцов, полученных под воздействием магнитного поля, показал, что их структура имеет более мелкие зерна, чем у образцов, не подверженных такой обработке.

Ключевые слова: магнитное поле, алюминий, кристаллизация, переохлаждение, фазовый переход, температура фазового равновесия.

Вдовин К.Н. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой технологии металлургии и литейных процессов Магнитогорского технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ) (455000, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38).
E-mail: kn.vdovin@gmail.com.

Дубский Г.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики МГТУ.

Егорова Л.Г. – канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики МГТУ.
E-mail: egorov-lyudmil@yandex.ru

Для цитирования: Вдовин К.Н., Дубский Г.А., Егорова Л.Г. Влияние магнитного поля на процесс кристаллизации алюминиевых расплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2018. No. 2. С. 34–42.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-2-34-42.

Vdovin K.N., Dubski G.A., Egorova L.G.

Magnetic field influence on the crystallization of aluminium melts

Conscious management of metal crystallization processes in order to obtain a defined ingot microstructure is provided by using various physical fields. These fields affect the melt and change its internal state, and therefore its crystallization kinetics. The paper describes the thermodynamics and kinetics of aluminum crystallization when the melt is treated with magnetic field. A quite simple experimental setup is created to allow studying the magnetic field effect on molten aluminum or other metals and alloys. It consists of several main components: (1) electrical furnace; (2) water-cooled copper crucible combined with an electromagnetic coil; (3) mechanical device for rapid movement of the aluminum melt crucible; (4) system for melt temperature monitoring and control and (5) electronics for data recording and processing. It is experimentally proved that magnetic field changes the melt-crystal phase equilibrium temperature, latent heat of phase transition and temperature of melt supercooling at crystallization. It is shown that changes in these parameters reduce the radius of critical nuclei and increases the speed of their origin. Temperature-time relationship are obtained for the crystallization process. It is experimentally proved that aluminum melt treatment with magnetic field reduces the time of crystallization. The analysis of aluminum samples obtained under the influence of magnetic field has shown that their structure has more fine grains compared with untreated samples.

Keywords: magnetic field, aluminum, crystallization, supercooling, phase transition, phase equilibrium temperature.

Vdovin K.N. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Head of Department of the technology of metallurgy and casting processes, Nosov Magnitogorsk State Technical University (MSTU) (455000, Russia, Magnitogorsk, Lenina av., 38).
E-mail: kn.vdovin@gmail.com.

Dubski G.A. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate prof., Department of physics, MSTU.

Egorov L.G. – Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of computer science and applied mathematics, MSTU.

E-mail: egorov-lyudmil@yandex.ru

Citation: *Vdovin K.N., Dubski G.A., Egorova L.G. Vliyanie magnitnogo polya na protsess kristallizatsii alyuminievyykh rasplavov. Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2018. No. 2. P. 34–42.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-2-34-42.

Введение

В настоящее время установлено, что на кристаллизацию заготовки в процессе литья влияет ряд факторов [1–6], которые можно разделить на внешние (различные физические поля, действующие на расплав) и внутренние, которые связаны непосредственно с кинетикой и динамикой атомов или их комплексов (кластеров) в ходе кристаллизации расплава. Указанные факторы определяют как скорость зарождения центров кристаллизации, так и кинетическую скорость роста кристаллов.

О процессе кристаллизации известно следующее:

- образование центров кристаллизации носит случайный характер;
- скорость их образования существенно зависит от квадрата величины переохлаждения расплава;
- наличие примесей существенно изменяет скорость зарождения центров;
- скорость роста кристаллов зависит от переохлаждения в первой степени.

Перечисленные факторы являются внутренними и связаны с термическим состоянием расплава и его чистотой.

К внешним факторам, влияющим на характер формирования зерен в кристаллизующемся расплаве, кроме внешних физических полей относят литейную форму, ее материал и характер отвода тепловой энергии от кристаллизующегося металла.

Таким образом, процесс формирования слитка с заданными размерами зерен является многофакторным, зависящим от многих переменных, характеризующих изменение свободной энергии кристаллизующегося расплава алюминия и теплофизического состояния формы, а также влияния внешних физических полей [7–9]. В работах [10–12] экспериментально показана и теоретически обоснована целесообразность использования магнитно-импульсной обработки расплавов. В начале 2000 г. появились исследования по обработке

расплавов наносекундными электромагнитными импульсами и их влиянию на кристаллизацию и структурообразование [13].

В настоящей работе описаны результаты действия мощного импульсного магнитного поля на термические и калорические состояния кристаллизующегося парамагнетика — расплава алюминия, определяющие кинетику кристаллизации. Основными параметрами, определяющими скорость зарождения центров кристаллизации и линейную скорость роста кристаллов, являются:

- температура начала кристаллизации;
- температура переохлаждения;
- скрытая теплота, выделяющаяся при кристаллизации;
- энергия поверхностного натяжения на границе кристалл—расплав.

Магнитные поля, как стационарные, так и нестационарные, изменяют состояние магнетика, но последние влияют на большее число его свойств, что приводит к изменению характеристик исследуемых сплавов [9, 14–26].

Теоретическая часть

Виды воздействия магнитного поля на магнетик, помещенный в это поле (импульсные и постоянные магнитные поля)

1. Намагничивание магнетика:

$$J = \chi H, \quad (1)$$

где χ — магнитная восприимчивость магнетика; H — напряженность магнитного поля, А/м.

2. Изменение энергетического состояния носителей магнетизма (электронов):

$$\Delta U = -2\mu_B H n, \quad (2)$$

где μ_B — магнетон Бора, n — концентрация электронов Паули.

3. Пондеромоторные силы, действующие на магнетик со стороны неоднородного магнитного

поля, пропорциональны градиенту квадрата напряженности магнитного поля:

$$f = \frac{\mu - 1}{2} \nabla H^2. \quad (3)$$

Здесь μ — магнитная проницаемость магнетика;

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k},$$

где \mathbf{i} , \mathbf{j} и \mathbf{k} — единичные орт-векторы.

4. Силы Ампера, действующие на токи в расплавленном магнетике со стороны магнитного поля, порождающие магнитогидродинамические эффекты:

$$F = \mu \mu_0 [\mathbf{j} \cdot \mathbf{H}] V, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, \mathbf{j} — плотность тока в магнетике, V — объем магнетика.

5. Возникновение магнитогидродинамических эффектов в расплавленном магнетике в случае действия на него нестационарных магнитных полей.

6. Выделение джоулева тепла в магнетике при действии на него нестационарного магнитного поля:

$$Q = \int \frac{j_z^2}{\lambda} 2\pi r dr, \quad (5)$$

где $j_z = \frac{\pi b \sqrt{r_0}}{p} \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{8}\right) - \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{8}\right) \right\}$ — плот-

ность тока в поверхностном слое; p^{-1} — глубина проникновения тока; r_0 — радиус цилиндрического магнетика; b — высота цилиндра; ω — циклическая частота магнитного поля.

Влияние магнитного поля на кинетику процесса кристаллизации парамагнитного металла

Кинетика процесса кристаллизации определяется характером изменения свободной энергии расплава при переходе его через температуру фазового равновесия жидкость—кристалл (T_s). На рис. 1 показан характер изменения свободной энергии Гиббса ($-G$) для жидкой и кристаллической фаз.

При внешнем физическом воздействии на расплав значения $\Delta G(H, T)$ могут быть как положительными, так и отрицательными. Если энергия внешнего физического поля поглощается расплавом, то $\Delta G > 0$, в противном случае $\Delta G < 0$. Рассмотрим оба случая:

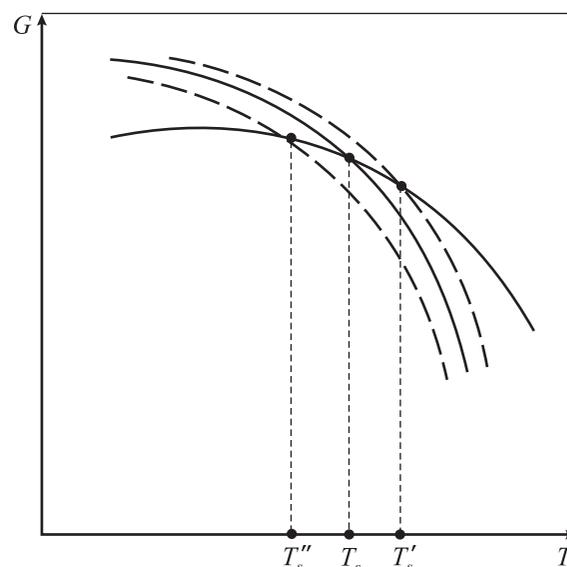


Рис. 1. Изменение свободной энергии Гиббса в зависимости от температуры жидкой (штриховые линии) и кристаллической (сплошные) фаз

— если $\Delta G > 0$, то температура фазового равновесия смещается в сторону больших значений, т.е. $T_s' > T_s$;

— если $\Delta G < 0$, то величина T_s смещается в сторону более низких температур относительно невозбужденной жидкой фазы, т.е. $T_s'' < T_s$.

Таким образом, если при отсутствии внешнего физического воздействия на расплав при его кристаллизации выделяется скрытая теплота фазового перехода (q_s), то при наличии этого воздействия последняя будет равна

$$q_s' = q_s + \Delta q \quad \text{при } \Delta G > 0,$$

$$q_s'' = q_s - \Delta q \quad \text{при } \Delta G < 0.$$

В случае действия на расплав магнетика магнитного поля имеют место выражения

$$\begin{aligned} q_s' &= q_s + \beta H^2, \\ q_s'' &= q_s - \alpha H^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где α и β — постоянные коэффициенты, зависящие от вида магнетика; H — напряженность магнитного поля, действующего на расплав.

Исследуемый расплав алюминия является парамагнетиком и в жидком, и в кристаллическом состояниях. Найдем вклад в его калорическое состояние со стороны магнитного поля. Требуется определить количество тепла, выделяющееся (поглощенное) в магнетике при парамагнетизме Пау-

ли в случае изотермического воздействия магнитного поля напряженностью H .

Выберем в качестве независимых переменных текущую температуру парамагнетика (T) и величину H ($V = \text{const}$). Потенциал Гиббса найдем по формуле

$$G = U - TS - \frac{BH}{4\pi}V, \quad (7)$$

где U — внутренняя энергия расплава; S — энтропия; B — индукция магнитного поля в расплаве.

Дифференциал от G будет равен

$$dG = -SdT - \frac{BdH}{4\pi}V. \quad (8)$$

Интегрируя это выражение при $V = \text{const}$ и учитывая, что $B = \mu(T)\mu_0H$, находим

$$G(T, H) = G(T, 0) - \frac{\mu_0\mu(T)}{8\pi}H^2, \quad (9)$$

где $G(T, H)$ — свободная энергия Гиббса при действии на магнетик магнитного поля H при заданной температуре T , а $G(T, 0)$ — в отсутствие магнитного поля.

Так как $S = -(\partial G/\partial T)_H$, получим

$$S(T, H) = S(T, 0) + \frac{\mu_0\mu'(T)}{8\pi}H^2, \quad (10)$$

где $\mu'(T) = (\partial\mu/\partial T)_H$.

Изменение скрытой теплоты фазового перехода при действии на магнетик магнитного поля описывается уравнением

$$q_s = T[S(H, T) - S(T, 0)] = \frac{\mu'\mu_0}{8\pi}TVH^2. \quad (11)$$

Для установления знака Δq_s , т.е. выяснения факта поглощения или выделения этого тепла магнетиком, необходимо найти знак при $\mu' = \partial\mu/\partial T$ для парамагнетизма Паули. Вместе с тем потенциальная энергия $d(-JH)$, или $d(-BH)$, парамагнетика уменьшается, поскольку их магнитные моменты ориентируются по полю. Поэтому возрастает кинетическая энергия, а с ней и температура магнетика. Парамагнетизм Паули достаточно сильно зависит от изменения концентрации валентных электронов вблизи уровня Ферми.

Покажем это изменение, используя выводы теории парамагнетизма Паули. Согласно этой теории

$$\chi = \frac{3n\mu_B^2}{2\varepsilon_F - \frac{3}{2}nU}, \quad (12)$$

где n — концентрация электронов проводимости;

ε_F — энергия Ферми; U — энергия обменного взаимодействия электронов Паули; μ_B — магнетон Бора.

Если $\varepsilon_F \gg nU$, то магнитная восприимчивость

$$\chi = \frac{3}{2} \frac{n\mu_B^2}{\varepsilon_F}. \quad (13)$$

С ростом текущей температуры концентрация валентных электронов в парамагнетике изменяется, а также понижается значение энергии Ферми. Так как при увеличении T объем магнетика растет, то

$$V_t = V_0(1 + \gamma T), \quad (14)$$

$$V_t - V_0 = \Delta V = V_0\gamma T,$$

где γ — объемный коэффициент расширения. Но $n = N/V$, где N — общее число электронов в валентной зоне.

Учитывая (3) и (4), получим

$$n_0 = \frac{N}{V_0}, \quad n_t = \frac{N}{V_t} = \frac{N}{V_0(1 + \gamma T)} = \frac{N}{V_0 + \Delta V}.$$

Изменение концентрации с увеличением температуры будет

$$\begin{aligned} \Delta n = n_0 - n_t &= N \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_0 + \Delta V} \right) = \\ &= N \frac{\Delta V}{V_0(V_0 + \Delta V)} \approx N \frac{\Delta V}{V_0^2} = n_0 \frac{\Delta V}{V_0}, \end{aligned} \quad (15)$$

однако $\Delta V/V_0 = \gamma T$, тогда

$$\Delta n = n_0\gamma T. \quad (16)$$

С учетом изменения концентрации электронов проводимости (5) и (2) получим

$$\chi = \frac{3}{2} \frac{\mu_B^2}{\varepsilon_F} (n_0 - \Delta n) = \frac{3}{2} \frac{\mu_B^2}{\varepsilon_F} n_0 (1 - \gamma T). \quad (17)$$

Из уравнения (17) видно, что при $T = 1/\gamma$ магнитная восприимчивость электронов Паули стремится к нулю. Для алюминия $\gamma = 7 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, $\chi = 0$, тогда $1 - \gamma T = 0$. Это соответствует температуре магнетика, равной примерно 14500 К. Данная оценка говорит о том, что парамагнетизм Паули имеет место в расплавленном металле, так как $T_{\text{пл Al}} \ll T$. Поскольку $\gamma T = 7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,33 = 0,65$, т.е. $\gamma T \ll 1$, то убывание магнитной восприимчивости Al с ростом температуры очень слабое, но конечное.

Учитывая проведенные расчеты, намагничен-

ность расплава алюминия от температуры представляется следующим образом:

$$J = \frac{3}{2} \frac{\mu_B^2}{\varepsilon_F} n_0 (1 - \gamma T) H. \quad (18)$$

Изменение J от T не ограничивается зависимостью концентрации электронов проводимости от температуры парамагнетика. С увеличением T изменяется и энергия Ферми (ε_F). В первом приближении, согласно квантовой теории проводников,

$$\varepsilon_F(T) = \varepsilon_F(0) \left[1 - \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{kT}{\varepsilon_F} \right)^2 \right]. \quad (19)$$

Поскольку ε_F входит в знаменатель намагниченности магнетика, то при уменьшении энергии Ферми величина J несколько возрастает. Основное влияние на J оказывает изменение концентрации валентных электронов, участвующих в парамагнетизме Паули. Поскольку $m = 1 + \chi$, тогда, учитывая (17), получим

$$\mu' = \frac{\partial \mu}{\partial T} = -\frac{3}{2} \frac{\mu_B^2}{\varepsilon_F} n_0 \gamma, \quad (20)$$

где n_0 — концентрация электронов в валентной зоне ферромагнетика.

Из выражений (11) и (20) получим изменение скрытой теплоты фазового перехода магнетика при наличии магнитного поля:

$$\Delta q_s = -\frac{3}{2} \frac{\mu_B^2}{\varepsilon_F} n_0 \gamma \frac{\mu_0}{2} H^2 T V. \quad (21)$$

Отрицательный знак при Δq_s будет указывать на то, что тепло поглощается.

Таким образом, при действии магнитного поля на расплав алюминия изменение потенциала Гиббса в зависимости от T , соответствующее жидкой фазе, смещается вверх на величину ΔG , значит, теплота фазового перехода будет иметь вид

$$q_s'' = q_s + \frac{3}{2} \frac{\mu_B^2}{\varepsilon_F} n_0 \gamma \frac{\mu_0}{2} H^2 T V, \quad (22)$$

или

$$q_s'' = q_s + \beta H^2,$$

где

$$\beta = \frac{3}{2} \frac{\mu_B^2}{\varepsilon_F} n_0 \gamma \frac{\mu_0}{2} T V,$$

т.е. β есть функция температуры.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что кристаллизация парамагнитного алюминия под действием магнитного поля смещается в сторону более высоких температур. Температура фазового равновесия расплав—кристалл при действии на расплав магнитного поля смещается в сторону более высоких значений на величину

$$\Delta T_s = T_s' - T_s = -T_s + \frac{q_s + \beta H^2}{q_s} T_s = T_s \frac{\beta H^2}{q_s}.$$

Пусть T — температура начала кристаллизации расплава алюминия, тогда температура переохлаждения будет

$$\begin{aligned} \Delta T(H) &= T_s' - T = T_s + \frac{\beta H^2}{q_s} T_s - T = \\ &= \left(1 + \frac{\beta H^2}{q_s} \right) T_s - T. \end{aligned} \quad (23)$$

Таким образом, температура переохлаждения при действии магнитного поля на расплав алюминия увеличивается.

Согласно проведенным расчетам можно сделать следующие выводы:

- магнитное поле изменяет калорическое состояние расплава алюминия $\Delta G > 0$;
- температура фазового равновесия расплав—кристалл смещается в сторону высоких значений;
- температура начала кристаллизации изменяется быстрее под действием на расплав магнитного поля, чем без него;
- температура переохлаждения выше при действии на расплав магнитного поля.

Далее рассмотрим влияние перечисленных факторов на скорость образования центров кристаллизации и линейную скорость роста кристаллов.

Согласно [15], если возникновение центров устойчивой фазы в объеме старой метастабильной диаграммы рассматривать как флуктуационный процесс, то скорость зарождения центров кристаллизации новой фазы описывается уравнением

$$V_{ц.к} = k e^{-U/(kT)} e^{-B\sigma^3/T}, \quad (24)$$

где $B = 32(\mu/\rho)^2 T_s^2 (k q_s^2)^{-1}$; $\Delta T = T_s' - T$; $k e^{-U/(kT)}$ — вероятность перехода атома из переохлажденного расплава в зародыш новой фазы; k характеризует частоту перескока атомов из расплава к фронту кристаллизации; T — температура кристаллизации, ΔT — температура переохлаждения; ρ — плотность закристаллизованного металла;

σ — поверхностная энергия на границе фронта кристаллизации; U — энергия активации перехода; $k = 1,38 \cdot 10^{23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; μ — молярная масса металла.

Для кубического зародыша связь между критическим размером и переохлаждением жидкости определяется следующим выражением:

$$r_k = \frac{2\sigma(\mu/\rho)T_s}{q_s \Delta T}, \quad (25)$$

где r_k — радиус сферы, вписанной в куб, м; ρ — плотность зародыша, кг/м³.

При действии на расплав алюминия магнитного поля параметры T_s , q_s и ΔT принимают новые значения, а именно

$$T_s' = T_s \left(1 + \frac{\beta H^2}{q_s} \right),$$

$$q_s^s = q_s + \beta H^2,$$

$$\Delta T(H) = T_s \left(1 + \frac{\beta H^2}{q_s} \right) - T.$$

Используя эти измененные значения, а также выражения (24) и (25) для $V_{ц.к}$ и r_k , получаем

$$r_k(T_s, 0) > r_k(T_s', H), \quad (26)$$

$$V_{ц.к}(T_s, 0) < V_{ц.к}(T_s', H), \quad (27)$$

т.е. при действии магнитного поля на расплав алю-

миния при его кристаллизации критический радиус зародыша новой фазы меньше, а скорость образования центров кристаллизации больше по сравнению с этими показателями без обработки. Это позволяет утверждать, что магнитное поле способствует формированию слитка с более мелким зерном.

Объем данной статьи не позволяет привести анализ действия на расплав при его кристаллизации других факторов, указанных в этой работе. Отметим только то, что при воздействии импульсного поля с амплитудой индукции $B > 0,5$ Тл, длительностью импульса $t_{и} < 0,5$ с и повторяемостью $N = 120$ имп/мин его влияние на формируемый слиток, как показывает опыт, может быть существенным.

Оборудование

Влияние импульсного магнитного поля на процесс кристаллизации алюминия марки АД 00 (ГОСТ 4784-97) исследовали на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 2.

Экспериментальная установка состоит из следующих основных узлов.

- Электропечь, нагревательными элементами которой являются силитовые стержни. Печь охлаждается водой. Температуру печи можно плавно регулировать и удерживать, управляя термодатчиком. Максимальная ее величина достигает $T = 1700$ °С.
- Водоохлаждаемый кристаллизатор, совмещенный с соленоидом, создающим магнитное поле

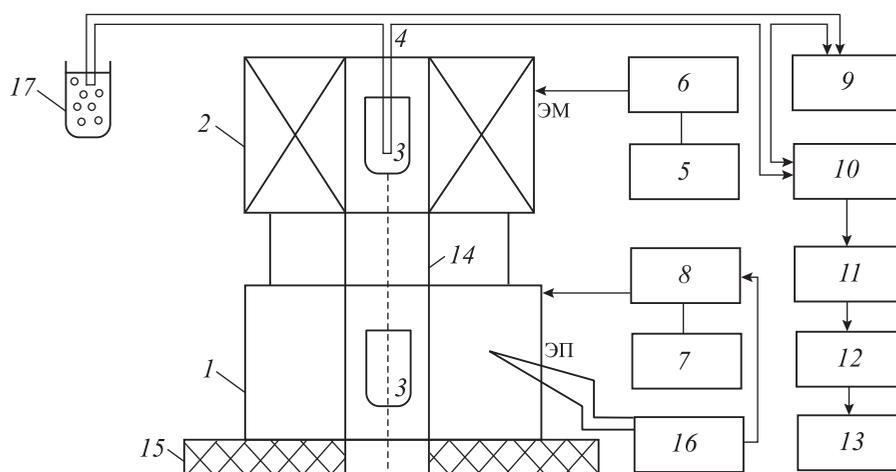


Рис. 2. Установка для исследования влияния магнитного поля на процесс кристаллизации

1 — электропечь на силитовых стержнях; 2 — электромагнит (постоянного и импульсного магнитных полей); 3 — тигель из Al_2O_3 ; 4 — термопара хромель-алюмелевая (ТХА); 5 — блок питания электромагнита; 6 — блок управления током электромагнита; 7 — блок питания электрической печи; 8 — блок питания и контроля тока электрической печи; 9 — однокоординатный самопишущий потенциометр КСП-4; 10 — усилитель термоэлектродвижущей силы; 11 — аналоговый цифровой преобразователь; 12 — компьютер; 13 — принтер; 14 — труба из Al_2O_3 ; 15 — основание электропечи и электромагнита; 16 — регулятор температуры печи; 17 — сосуд Дьюара для холодного спая ТХА

в объеме кристаллизатора. Последний включает в себя дополнительную электропечь, позволяющую создавать заданный градиент температуры между охлаждаемым образцом и стенкой кристаллизатора.

- Механическое устройство быстрого перемещения тигля с расплавом из печи в кристаллизатор и обратно.
- Система контроля и управления температурой образца, печи и кристаллизатора.
- Электронная часть для записи и обработки информации о температурно-временном состоянии исследуемого образца.

Методика эксперимента

Исследуемый образец из алюминия помещают в тигель, который находится в электропечи, предварительно нагретой до необходимой температуры. После расплавления пробы в нее вводят специально сконструированную термопару. Предварительно настраивают аппаратуру для записи информации о температурно-временном состоянии исследуемого образца и подключают электрическую схему для создания магнитного поля. Устанавливают необходимый градиент температуры между образцом и стенкой кристаллизатора. С помощью механического устройства тигель с расплавом поднимают в кристаллизатор и ведут запись изменения температуры при охлаждении расплава в кристаллизаторе. Далее осуществляют обработку полученных экспериментальных данных.

Процесс кристаллизации алюминия в отсутствие магнитного поля длился $t_0 \approx 2,5$ мин. Индукция магнитного поля $B = 0,45$ Тл. Время кристаллизации в магнитном поле значительно меньше, чем без него ($\tau_H < \tau_0$). Объем исследуемого расплава алюминия составлял $V_{Al} = 32$ см³, что согласно литературным данным является наиболее приемлемым для подобных исследований [7], а масса $m_{Al} = 86$ г. Форма тигля — цилиндрическая, диаметр образца $d = 24$ мм, высота образца $h = 70$ мм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены температурные зависимости охлаждения расплава алюминия под воздействием магнитного поля и без него. Видно, что в отсутствие магнитного поля температура переохлаждения

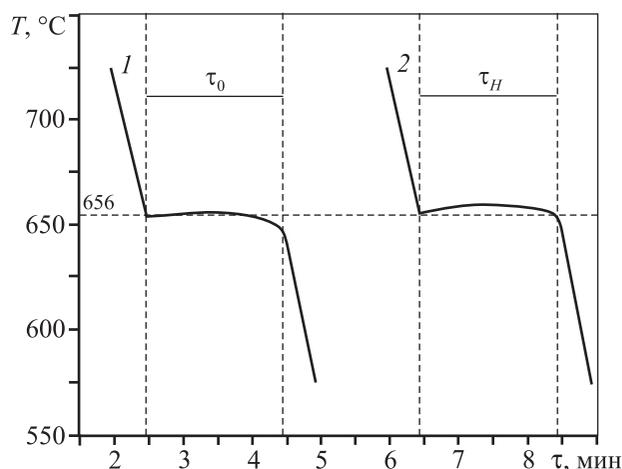


Рис. 3. Температурно-временные зависимости температуры охлаждения расплава алюминия в отсутствие магнитного поля (1) и под его воздействием (2)

охлаждения алюминия ниже, чем при его воздействии, а значит, и время кристаллизации будет больше.

Заключение

Создана достаточно простая экспериментальная установка, позволяющая изучать процессы воздействия магнитного поля на расплав алюминия или других металлов и сплавов.

Анализируя приведенные на рис. 3 температурно-временные зависимости температуры охлаждения расплава алюминия под воздействием магнитного поля, можно сделать следующие выводы:

- температура переохлаждения начала кристаллизации расплава алюминия выше;
- скрытая теплота кристаллизации также больше;
- время кристаллизации одного и того же объема расплава алюминия меньше;
- увеличивается скорость зарождения центров кристаллизации, что влечет за собой значительное сокращение продолжительности процесса кристаллизации.

Литература/References

1. Дибров И.А. Состояние и перспективы развития производства отливок из алюминиевых сплавов в России. *Литейщик России*. 2007. No. 5. С. 28—29; Dibrov I.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya proizvodstva otlivok iz alyuminievykh spлавov v Rossii [The state and prospects of development of production of castings

- of aluminum alloys in Russia]. *Liteishchik Rossii*. 2007. No. 5. P. 28—29.
2. *Ren-Guo Guan, Tie D.* A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects. *Acta Metall. Sinica*. 2017. Vol. 30(5). P. 409—432.
 3. *Deev V.B., Selyanin I.F., Kutsenko A.I., Belov N.A., Ponomareva K.V.* Promising resource saving technology for processing melts during production of cast aluminum alloys. *Metallurgist*. 2015. Vol. 58. No. 11-12. P. 1123—1127.
 4. *Мочалов П.П., Гецелев З.Н.* Литье в электромагнитные кристаллизаторы. *Цвет. металлы*. 1970. No. 8. С. 62—63; *Mochalov P.P., Getsel'ev Z.N.* Lit'e v elektromagnitnye kristallizatory [Casting in electromagnetic mold]. *Tsvet. metally*. 1970. No. 8. P. 62—63.
 5. *Ordóñez S., Bustos O., Colás R.* Термический и микроструктурный анализ алюминиевого сплава А356, затвердевшего под действием магнитного перемешивания. *Международ. журн. по металлообработке*. 2009. С. 189—197; *Ordóñez S., Bustos O., Colás R.* Termicheskiy i mikrostrukturnyy analiz alyuminievogo splava А356, zatverdevshego pod deistviem magnitnogo peremeshivaniya [Thermal and microstructural analysis of aluminum alloy А356, solidified by magnetic stirring]. *Mezhdunarodny zhurnal po metalloobrabotke*. 2009. P. 189—197.
 6. *Deev V.B., Selyanin I.F., Tsetsorina S.A.* Refining the cluster model of metallic melts. *Steel Trans*. 2008. Vol. 38. No. 8. P. 623, 624.
 7. *Селянин И.Ф., Деев В.Б., Белов Н.А., Приходько О.Г., Пonomareva К.В.* Физические модифицирующие воздействия и их влияние на кристаллизацию литейных сплавов. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2015. No. 3. С. 56—59; *Selyanin I.F., Deev V.B., Belov N.A., Prikhodko O.G., Ponomareva K.V.* Physical modifying effects and their influence on the crystallization of casting alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met*. 2015. Vol. 56. No. 4. P. 434—436.
 8. *Ефимов В.А., Эльдарханов А.С.* Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004; *Efimov V.A., El'darkhanov A.S.* Tekhnologii sovremennoi metallurgii [Technologies of modern metallurgy]. Moscow: Novye tekhnologii, 2004.
 9. *Заббаров Р., Бибиков А.М., Живодеров В.М.* Структурные изменения и свойства алюминиевых сплавов, обработанных магнитным полем. *Металлургия машиностроения*. 2009. No. 6. С. 25—27; *Zabbarov R., Bibikov A.M., Zhivoderov V.M.* Strukturnye izmeneniya i svoystva alyuminievyykh splavov, obrabotannykh magnitnym polem [Structural changes and properties of aluminium alloys processed by magnetic field]. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2009. No. 6. P. 25—27.
 10. *Никитин К.В., Амосов Е.А., Никитин В.И., Глушченков В.А., Черников Д.Г.* Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2015. No. 5. С. 11—19; *Nikitin K.V., Amosov E.A., Nikitin V.I., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G.* Theoretical and experimental substantiation of treatment of aluminum-based melts by pulsed magnetic fields. *Russ. J. Non-Ferr. Met*. 2015. Vol. 56. No. 6. P. 599—605.
 11. *Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Глушченков В.А., Черников Д.Г.* Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силуминов. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2016. No. 2. С. 34—42; *Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G.* Melt treatment by pulsed magnetic fields aimed at controlling the structure and properties of industrial silumins. *Russ. J. Non-Ferr. Met*. 2016. Vol. 57. No. 3. P. 202—210.
 12. *Тимошкин И.Ю., Никитин К.В., Никитин В.И., Деев В.Б.* Влияние обработки расплавов электромагнитными акустическими полями на структуру и свойства сплавов системы Al—Si. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2016. No. 3. С. 28—33; *Timoshkin I.Y., Nikitin K.V., Nikitin V.I., Deev V.B.* Influence of treatment of melts by electromagnetic acoustic fields on the structure and properties of alloys of the Al—Si system. *Russ. J. Non-Ferr. Met*. 2016. Vol. 57. No. 4. P. 419—423.
 13. *Ри Э.Х., Дорофеев С.В., Якимов В.И.* Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов. Владивосток: Дальнаука, 2008; *Ri E.Kh., Dorofeev S.V., Yakimov V.I.* Vliyanie oblucheniya zhidkoi fazy nanosekundnymi elektromagnitnymi impul'sami na ee stroenie, protsessy kristallizatsii, strukturoobrazovaniya i svoystva liteinykh splavov [Effect of irradiation of the liquid phase by nanosecond electromagnetic pulses on its structure, crystallization, structure and properties of casting alloys]. Vladivostok: Dal'nauka, 2008.
 14. *Микельсон А.Э., Фолифоров В.М.* МГД-методы и устройства в промышленности. *Магнитная гидродинамика*. 1975. No. 1. С. 129—140; *Mikel'son A.E., Foliforov V.M.* MGD-metody i ustroystva v promyshlennosti. [MHD-methods and devices in the industry]. *Magnitnaya gidrodinamika*. 1975. No. 1. P. 129—140.
 15. *Александров Л.Н.* Кинетика образования структуры твердых слоев. Новосибирск: Наука, 1972; *Aleksandrov L.N.* Kinetika obrazovaniya struktury tverdykh sloev [Kinetics of the formation of the structure of solid layers]. Novosibirsk: Nauka, 1972.

16. Propescu M., Vagra B. Microstructure of aluminum alloys solidified by rotating electric field. *Mater. Mech.* 2015. No. 10. P. 44–48.
17. Zhang Y., Cheng X., Zhong H., Xu Z., Li L., Gong Y., Miao X., Changjiang, Song C., Zhai Q. Comparative study on the grain refinement of Al–Si alloy solidified under the impact of pulsed electric current and travelling magnetic field. *Metals*. 2016. Vol. 6. P. 170.
18. Hongsheng D., Yong Z., Sanyong J., Ruirun C., Zhilong Z., Jingjie G., Daming X., Hengzhi F. Influences of pulse electric current treatment on solidification microstructures and mechanical properties of Al–Si piston alloys. *China Foundry*. 2008. Vol. 6. No. 1. P. 24–31.
19. Bustos O., Ordoñez S., Colás R. Rheological and microstructural study of A356 alloy solidified under magnetic stirring. *Int. J. Metalcasting*. 2013. Vol. 7. No. 1. P. 29–37.
20. Wang X., Luo X., Cong F., Cui J. Research progress of microstructure control for aluminium solidification process. *Chinese Sci. Bull.* 2013. Vol. 58. No. 4-5. P. 468–473.
21. Wang, X., Sun, G., Wang, L., Ma Q., Cui J. A new approach for preparing SiC particle-reinforced aluminum matrix composites by applying electromagnetic field. *J. Wuhan Univ. of Technology (Mater. Sci.)*. 2016. Vol. 31. No. 4. P. 717–721.
22. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao C.M., Dahmen K.A., Peter K., Lu Z.P. Effect of electromagnetic field on microstructure and properties of bulk AlCrFeNiMo_{0,2} high-entropy alloy. *J. Mater. Eng. Perform.* 2015. Vol. 4. No. 11. P. 4475–4481.
23. Jie J.C., Zou Q.C., Sun J.L., Lu Y.P., Wang T.M., Li T.J. Separation mechanism of the primary si phase from the hypereutectic Al–Si alloy using a rotating magnetic field during solidification. *Acta Mater.* 2014. Vol. 72. P. 57–66.
24. Haghayeghi R., de Paula L.C., Zoqui E.J. Comparison of Si refinement efficiency of electromagnetic stirring and ultrasonic treatment for a hypereutectic Al–Si alloy. *J. Mater. Eng. Perform.* 2017. Vol. 26. No. 4. P. 1900–1907.
25. Ünal N., Çamurlu H.E., Koçak S., Düztepe G. Effect of external ultrasonic treatment on hypereutectic cast aluminium–silicon alloy. *Int. J. Cast Met. Res.* 2013. Vol. 25. No. 4. P. 246–250.
26. Ünal N., Çamurlu H.E., Koçak S., Düztepe G. Effect of external ultrasonic treatment on hypereutectic cast aluminium–silicon alloy. *J. Mater. Res. Technol.* 2013. Vol. 2. No. 2. P. 100–109.