

С. Л. Т и м ч е н к о

**СПОСОБ КОНТРОЛЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

Рассмотрен альтернативный способ контроля фазового перехода при кристаллизации алюминиевого сплава, основанный на измерении падения напряжения на образце. Показано, что использование дополнительного внешнего воздействия в виде электрического тока позволяет не только контролировать процесс фазового перехода, но также влиять на свойства материала изделия, улучшая их на этапе его изготовления. Определено значение коэффициента теплопроводности сплава. Проведен анализ влияния теплофизических свойств окружающей среды и внешнего электрического воздействия в виде электрического тока на динамику движения фронта кристаллизации в условиях фазового перехода.

E-mail: svtimchenko@yandex.ru

Ключевые слова: электрический ток, электропроводность, кристаллизация, эвтектика.

Известно, что свойства изделия формируются в большей части на этапе его изготовления. При получении изделия с помощью литейных технологий существуют технологические этапы, которые влияют на качество изделия: приготовление расплава, заливка, затвердевание, извлечение готового изделия. В настоящее время достаточно активно изучается и используется на практике влияние электрического тока, магнитного и электромагнитного полей на процесс кристаллизации и физические свойства материала отливок. Магнитные и электромагнитные поля используют при обработке расплава перед заливкой его в форму для перемешивания расплава в тигле или форме, разогрева металла в прибылях. Электрический ток влияет на интенсивность массопереноса, газосодержание металлов, растворимость примесных компонентов [1–6]. Отливки, кристаллизация которых происходила в условиях пропускания электрического тока, имеют лучшие механические свойства по сравнению с отливками, кристаллизация которых осуществлялась традиционным методом. Локальный характер теплового и векторного действия электрического тока позволяет получить структуру материала, обладающую наименьшим числом дефектов, таких как газовые поры, усадочные раковины. Формирование отливок указанным способом позволяет уменьшить их осевую рыхлость.

Важная составляющая технологии получения качественного литого изделия — это возможность контроля процесса кристаллизации и затвердевания отливки в целом. Общепринятый параметр, с помощью которого контролируют литейные процессы, — температура. Существующие способы бесконтактного измерения температуры, в основе

которых лежит принцип регистрации излучения нагретого тела, позволяют определять температуру поверхности, а для измерения температуры в отливке можно использовать термопары, позволяющие зарегистрировать локально температуру образца. Как правило, свойства расплава в форме пространственно неодинаковы, поэтому для контроля температуры в объеме используют несколько термопар, располагаемых в различных сечениях отливки.

Экспериментальная часть. Цель настоящей работы заключается в создании альтернативного способа контроля процесса кристаллизации алюминиевого сплава, основанного на измерении падения напряжения на образце. Для этого использована экспериментальная установка [4], позволяющая пропускать через отливку постоянный электрический ток в процессе ее кристаллизации.

Электрический ток плотностью $j \sim (10^4 \dots 10^6) \text{ А/м}^2$ пропускали через расплав, находящийся в песчаной форме. Химический состав исследуемого сплава на основе алюминия, определенный с помощью спектрального анализа, следующий, %: Si 10,47; Cu 1,75; Fe < 0,2; Cr 0,02; Mg < 0,02; Mn < 0,02; Ni 0,08, остальное — алюминий, что позволяет отнести этот сплав к силуминам с маркировкой АК12 (доэвтектический сплав).

При нахождении жидкого металла в форме и его кристаллизации в процессе электрического воздействия измерялась временная зависимость падения напряжения $U(t)$ на образце, используя которую можно без измерения временной температурной зависимости материала отливки при ее кристаллизации определить скорость $dU(t)/dt$, а также время фазового перехода материала образца. Учитывая условия теплоотвода и состав сплава, отметим, что фазовый переход происходит не мгновенно во всем объеме, а имеет конечный временной интервал. На рис. 1 представлена экспериментальная временная зависимость падения напряжения 1 на образце и силы тока 2 для сплава АК12.

Результаты и их обсуждение. Измеряемое экспериментально падение напряжения $U(t)$ определяется результирующим электрическим сопротивлением твердой и жидкой фаз образца. Поэтому можно ввести соотношение, которое связывает массу твердожидкой фазы с падением напряжения на образце $U(t)$:

$$\frac{dm_{L-S}}{dt} = a \frac{dU}{dt}. \quad (1)$$

Здесь a — коэффициент пропорциональности, кг/В, значение которого определяется как $a = \frac{m_o}{U(0)}$, где m_o — исходная масса жидкого расплава, $U(0)$ — значение разности потенциалов в момент времени, соответствующий началу фазового перехода. При пропускании через образец

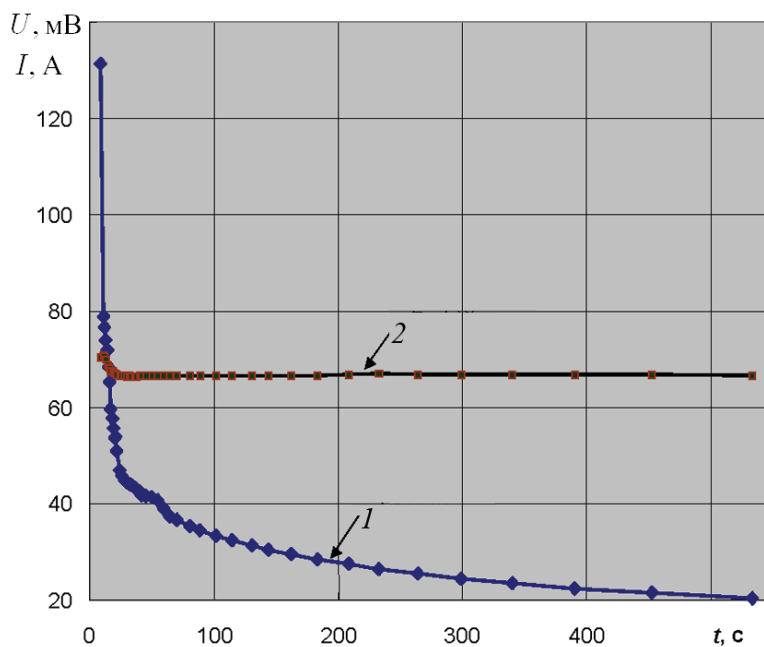


Рис. 1. Экспериментальная временная зависимость падения напряжения (1) на образце и силы тока (2)

тока силой $I = 66$ А получено для $U(0) = 0,225$ В и $m_o = 60 \times 10^{-3}$ кг значение коэффициента $a = 0,3$ кг/В.

Измеряемая разность потенциалов позволяет определить в динамике временную зависимость коэффициента теплопроводности λ сплава. Рассмотрим электронную часть теплопроводности материала, используя закон Видемана–Франца

$$\lambda = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 \frac{T}{\rho}. \quad (2)$$

Переходя к параметрам образца, с учетом временных зависимостей величин $T(t)$ и $U(t)$, $I(t)$ сплава получаем

$$\lambda = 8,55 \cdot 10^{-5} \frac{T(t)I(t)}{U(t)}. \quad (3)$$

Совместное измерение температуры, падения напряжения и силы тока позволяет определить коэффициент теплопроводности сплава как в жидком состоянии, так и на этапе фазового перехода. На рис. 2 представлена температурная зависимость коэффициента теплопроводности сплава АК 12 в диапазоне температур $680 < T < 995$ К, включающем область фазового перехода.

Электрический ток является дополнительным фактором, с помощью которого можно влиять на свойства материала не только в состоянии расплава, но и в твердом состоянии [7–10]. Наряду с тепловым воздействием, обуславливающим дополнительный прогрев отливки, электрический ток оказывает также силовое действие на кристаллическую решетку материала проводника. Явление возникновения механических напряжений в проводящей среде под действием электрического

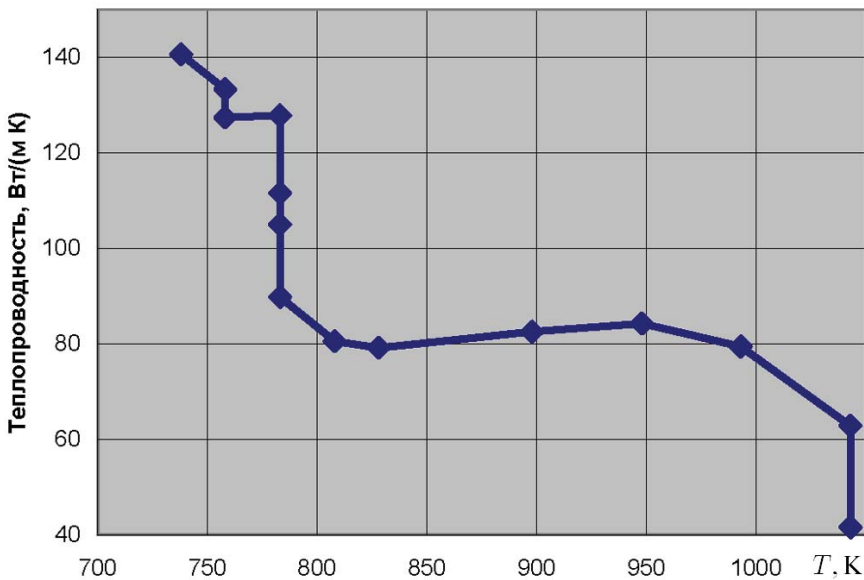


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности образца

тока высокой плотности ($j \geq 10^8 \text{ A/m}^2$) в условиях интенсивного охлаждения образца используется в качестве метода обработки металлов и сплавов [8].

Наличие электроупругих напряжений в металлах существенно влияет на их физические характеристики, при этом такое влияние может быть как обратимым, так и необратимым. Это связано с тем, что кристаллическая решетка реальных металлов и сплавов не является совершенной (блочная структура, поры, дислокации, точечные дефекты). Поэтому механические напряжения, созданные действием электрического тока в проводнике, обуславливают эволюцию дефектной структуры (изменение размеров и формы протяженных дефектов, перераспределение, размножение или аннигиляция дислокаций, рекристаллизация, фазовые превращения, релаксация упругих напряжений и т.д.), что в итоге приводит к необратимым изменениям механических (пластичность, прочность и др.), электрических, магнитных свойств металлов и сплавов. Наряду с этим возможно и обратимое влияние электрического тока на физические параметры металла [9, 10].

В условиях фазового перехода следует учитывать как механическое действие тока, так и его локальное тепловое действие. При протекании тока (в режиме стабилизации) через расплав, содержащий частично твердую фазу, происходит дополнительное охлаждение жидкой фазы ($\Delta q > 0$), связанное с различием их удельных электросопротивлений — $\rho_L > \rho_S$:

$$\Delta q = q_L - q_S = j^2 \rho_S \left(\frac{\rho_L}{\rho_S} - 1 \right); \tag{4}$$

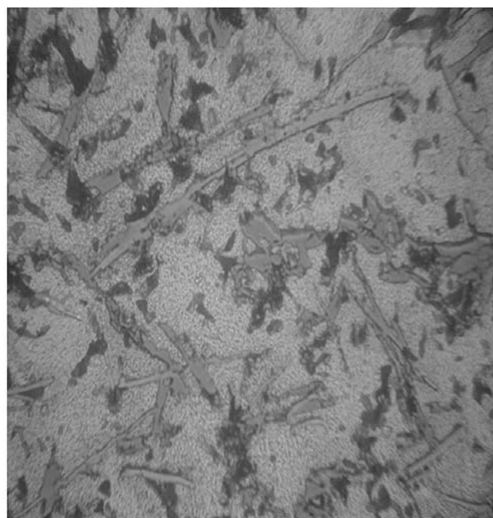
$$\Delta T = \frac{j^2 \rho_S}{c_L \gamma} \left(\frac{\rho_L}{\rho_S} - 1 \right) \Delta t,$$

где ΔT — переохлаждение, К; c_L — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и ρ_L — удельное сопротивление жидкой фазы; ρ_S — удельное сопротивление твердой фазы, Ом·м; γ — плотность, кг/м³. Увеличение степени переохлаждения приводит к уменьшению критического размера зародыша [11].

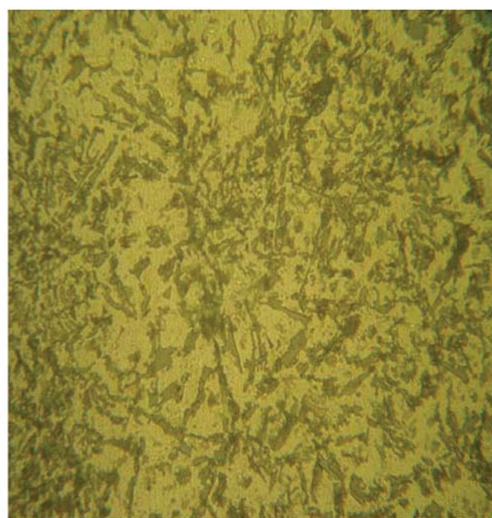
Локальное температурное поле двухкомпонентного сплава определяется характером распределения добавочного компонента в растворителе. Для сплава АК12 растворенный кристаллический кремний потенциально является центром кристаллизации. Существенное различие в электрических свойствах компонентов сплава вызывает при пропускании тока изменение тепловых потоков по границам Al и Si. В результате воздействия электрического тока на сплав при его кристаллизации происходит перераспределение эвтектики в твердом растворе, увеличивается степень дисперсности эвтектики в колониях, изменяются границы зерен. Составляющие эвтектических зерен становятся мелкодисперсными. Изменения в микроструктуре сплава подтверждаются результатами металлографических исследований образцов.

На рис. 3 представлена микроструктура сплава АК12, кристаллизация которого проходила без внешнего воздействия (рис. 3, *а*) и с внешним воздействием при пропускании электрического тока $I = 66$ А (рис. 3, *б*). Эвтектические включения в сплаве после обработки электрическим током уменьшаются в размере, их распределение становится более равномерным, площадь твердого раствора уменьшается.

Вследствие структурных преобразований в сплаве под действием тока происходят изменения и в его свойствах. Наряду с прочностью и электросопротивлением одним из структурно-чувствительных свойств сплава является твердость. По измерению твердости можно судить о структурных преобразованиях в сплаве. Было обнаружено изменение



а



б

Рис. 3. Микроструктура сплава АК12 (центральная часть образца $\times 500$):
а — $I = 0$; *б* — $I = 66$ А,

твердости материала, согласующееся с результатами металлографических исследований. При плотности тока через образец $7,3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ увеличение твердости в среднем составило 40%. Вместе с тем при обработке отливки электрическим током в процессе ее кристаллизации уменьшается разброс твердости материала по сечению. Твердость периферийной и центральной областей образца, кристаллизация которого происходила в обычных условиях, различается примерно на 12,5%. Для образца, обработанного электрическим током при кристаллизации ($j = 7,3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$) различие в твердости для указанных областей образца составило $\sim 4,4\%$. Учитывая, что твердость исследованного сплава определяется геометрией и размером эвтектики, растворимостью кремния в твердом растворе, можно сделать вывод, что электрический ток интенсифицирует процессы переноса компонентов в сплаве.

Ниже представлена упрощенная физическая модель, позволяющая объяснить временную зависимость падения напряжения на образце $U(t)$, для чего рассмотрено движение фронта кристаллизации в поперечном направлении за счет теплообмена с формой.

Пусть в начальный момент времени объем жидкого металла имеет температуру фазового перехода $T_{\text{ф.п.}}$. Рассматриваемый объем имеет форму цилиндра (рис. 4) радиусом a и длиной l ; ζ — координата фронта кристаллизации. Коэффициент теплоотдачи на поверхности контакта металла с формой — k , Вт/(м²·К); T_0 — температура окружения (формы).

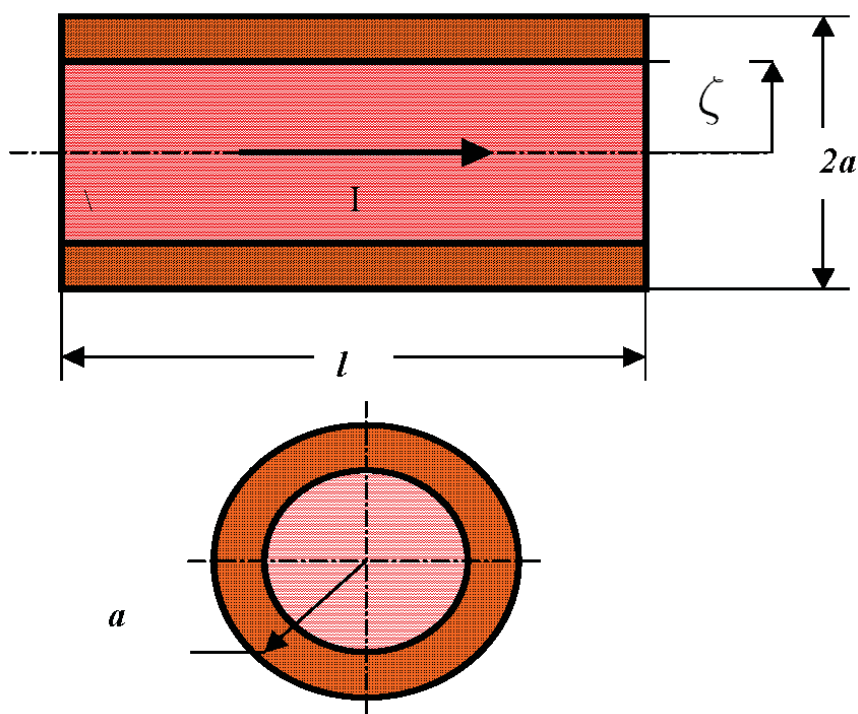


Рис. 4. Геометрические параметры образца

Будем считать, что теплота, выделяемая при кристаллизации и подводимая за счет источника тока, передается в окружающее пространство через боковую поверхность. В этом случае уравнение теплового баланса можно представить в виде

$$\frac{dQ_{\text{ф.п}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{Дж.-Л}}}{dt} = \frac{dQ_{\text{бок}}}{dt}, \quad (5)$$

где $dQ_{\text{ф.п}} = 2\pi L\gamma\zeta l d\zeta$ — теплота, выделяемая при фазовом переходе; L — удельная теплота плавления; $dQ_{\text{Дж.-Л}} = j^2 \rho_L \pi a^2 l dt$ — теплота Джоуля–Ленца; $dQ_{\text{бок}} = k(T - T_0) 2\pi a l dt$ — теплота, уносимая через боковую поверхность за счет теплоотдачи; T_0 — температура окружающей среды. На основе (5) получаем дифференциальное уравнение

$$-\zeta \frac{d\zeta}{dt} = B, \quad (6)$$

которое решается относительно координаты фронта кристаллизации ζ . Здесь $B = \frac{1}{2\pi l \gamma L} (2\pi a l k (T - T_0) + j^2 \rho_L \pi a^2 l)$; j — плотность тока; ρ_L — удельное электросопротивление жидкой фазы при температуре фазового перехода. Значение коэффициента B зависит от свойств сплава, условий теплообмена и параметров внешнего воздействия.

Решением уравнения (6) является временная зависимость координаты фронта кристаллизации

$$\zeta = \sqrt{a^2 - 2Bt}, \quad (7)$$

из которой определяется скорость движения фронта кристаллизации в поперечном направлении

$$-\frac{d\zeta}{dt} = \frac{B}{\sqrt{a^2 - 2Bt}}. \quad (8)$$

Так как рассматриваемый фронт кристаллизации движется от периферии к центру, то эквивалентная электрическая схема образца может быть представлена параллельно включенными электрическими сопротивлениями жидкой (R_L) и твердой (R_S) фаз металла:

$$R_L = \rho_L \frac{l}{S_\zeta} = \rho_L \frac{l}{\pi \zeta^2} = \rho_L \frac{l}{\pi (a^2 - 2Bt)};$$

$$R_S = \rho_S \frac{l}{S_{a-\zeta}} = \rho_S \frac{l}{\pi (a^2 - \zeta^2)} = \rho_S \frac{l}{2\pi Bt}.$$

Результирующее сопротивление

$$R = \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} = \frac{\rho_S \rho_L l}{\pi (\rho_L (a^2 - \zeta^2) + \rho_S \zeta^2)}.$$

Падение напряжения на образце

$$U = I \frac{\rho_S \rho_L l}{\pi (2Bt(\rho_L - \rho_S) + \rho_S a^2)}. \quad (9)$$

Полученные зависимости позволяют проанализировать влияние теплофизических свойств окружающей среды (коэффициент теплоотдачи) и внешнего воздействия (электрического тока) на динамику движения фронта кристаллизации. Также при наличии адекватной физической модели данного процесса по измерению падения напряжения на образце можно определять коэффициент теплоотдачи формы.

С использованием зависимостей (7) и (9) были проведены расчеты, позволяющие проанализировать влияние внешних параметров на динамику изменения координаты фронта кристаллизации и падения напряжения для цилиндрического образца из алюминия, имеющего размеры $a = 3$ мм и $l = 30$ мм и следующие свойства: удельная теплота плавления $L = 3,9 \cdot 10^5$ Дж/кг; плотность $\gamma = 2,428 \cdot 10^3$ кг/м³ (при $T = 933$ К); удельное электрическое сопротивление $\rho_L = 4,1 \times 10^{-8}$ Ом·м. Плотность тока составляла $j = 10^7$ А/м²; температура окружающей среды $T_0 = 293$ К.

На рис. 5 приведены расчетные временные зависимости координаты фронта кристаллизации $\zeta(t)$ и падения напряжения на образце $U(t)$ при коэффициенте теплоотдачи $k = 50$ Вт/(м²·К).

На рис. 6 представлены зависимости координаты фронта кристаллизации ζ от плотности электрического тока j в разные моменты времени.

Учет сопротивления твердой и жидкой фаз образца делает возможным вычисление баланса тепловыделений при протекании электрического тока в виде теплоты Джоуля–Ленца. Разогрев твердой фазы за счет электрического тока является дополнительным фактором, который позволяет регулировать температурный фронт по сечению отливки, что приводит к уменьшению механических напряжений и при высоких плотностях тока позволяет влиять на динамику и обратимость процесса фазового перехода.

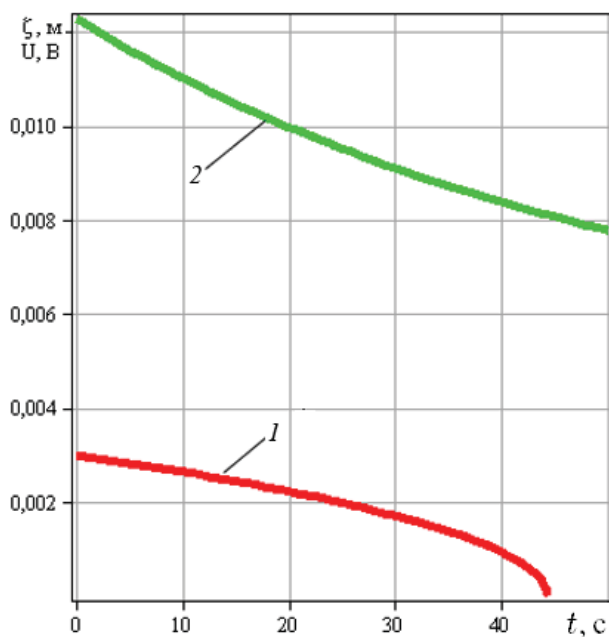


Рис. 5. Временные зависимости координаты фронта кристаллизации (1) и разности потенциалов (2)

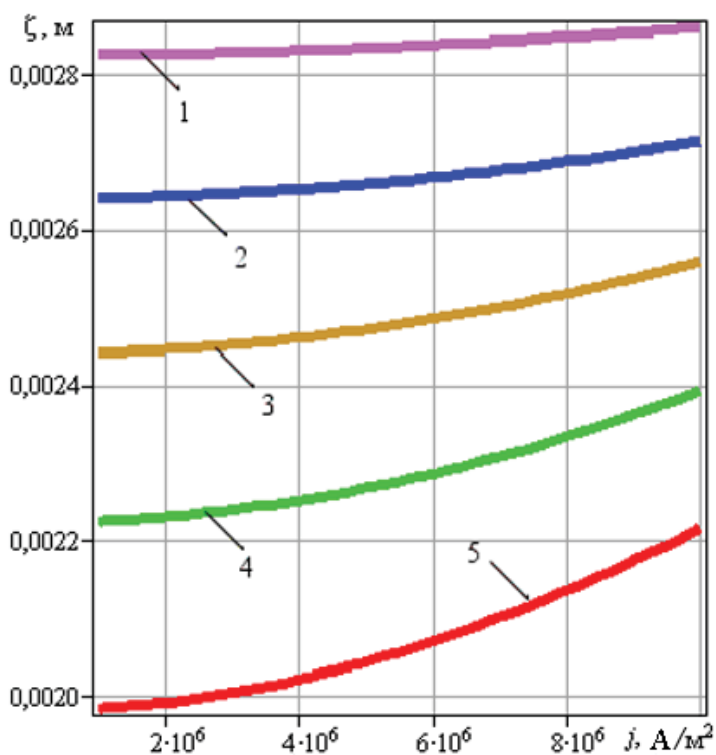


Рис. 6. Зависимость координаты фронта кристаллизации ζ от плотности тока для моментов времени $t = 5, 10, 15, 20, 25$ с — соответственно кривые 1, 2, 3, 4, 5

Существует два режима воздействия на образец за счет пропускания постоянного электрического тока: режим стабилизации тока и режим стабилизации напряжения. В режиме стабилизации напряжения $U \neq f(t)$ и баланс тепловыделений имеет вид $q_S/q_L = \rho_L/\rho_S$. Теплота Джоуля–Ленца, выделяемая при протекании электрического тока через образец, влияет не только на теплофизическое состояние расплава и в дальнейшем кристаллизующегося сплава, а также на теплообмен между отливкой и формой. Это позволяет регулировать тепловой режим отливки, а также системы отливка–форма и, кроме того, использование электрического тока в процессе формирования отливки позволяет уменьшить вероятность возникновения структурных несплошностей в образце, приводит к уменьшению дефектности отливок, перераспределению неметаллических включений, снижению осевой ликвации [1–6].

Выводы. Действие электрического тока в процессе формирования отливки является мощным фактором, позволяющим управлять процессом зародышеобразования, распределением эвтектики за счет активирования тепловыделений на границах включение–матрица, а следовательно, управлять формированием свойств материала. Использование дополнительного внешнего воздействия в виде электрического тока позволяет изменять свойства материала изделия, улучшая их на этапе его изготовления, а также контролировать процесс фазового перехода. Анализ результатов расчета показал, что существенное влияние на скорость движения фронта кристаллизации оказывает коэффициент теплоотдачи формы. Тепловое влияние тока на скорость процесса кристаллизации в макрообъеме имеет место при $j > 10^7 \text{ A/m}^2$.

Однако, как показывают результаты исследований микроструктуры и свойств сплавов, рассмотренные в настоящей работе, а также результаты ранних исследований [1–6], электрический ток плотностью $10^3 \leq j < 10^7$ А/м², применяемый при обработке расплава, а также на этапе его кристаллизации, положительно влияет на свойства материала. Таким образом, при кристаллизации в присутствии электрического тока возникают независимые от температурного поля, сформированного теплообменом, дополнительные конвективные потоки, влияющие на формирование границ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д о р о ф е е в А. В., К и л и н А. Б., Т е р т и ш н и к о в А. С. Обработка алюминиевых расплавов электротоком // Литейщик России. – 2002. – № 2. – С. 19–21.
2. П а т е н т России 2220816 С2 МПК7 В22D 27/02 // Бюл. Открытия, изобретения, товарные знаки. – 2004. – № 1.
3. Р ы б к и н В. А., Т и м ч е н к о С. Л. Кристаллизация алюминиевого сплава под действием электрического тока // Литейное производство. – 2003. – № 10. – С. 17–19.
4. Т и м ч е н к о С. Л., З а д о р о ж н ы й Н. А. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевого сплава // Литейное производство. – 2005. – № 9. – С. 12–13.
5. Д е е в В. Б., С е л ь н и н И. Ф., Н о х р и н а О. И., Б а ш м а к о в а Н. В. Влияние температурной обработки и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов // Заготовительное производство в машиностроении. – 2008. – № 4. – С. 50–53.
6. К о л ь ч у г и н а И. Ю., С е л ь н и н И. Ф. Влияние внешних воздействий на микроструктуру кристаллизующегося сплава // Литейное производство. – 2009. – № 8. – С. 13–15.
7. С о н г р а d Н., К а р а m N., М а n n a n S., S p r e c h e r A. F. Effect of electric current pulses on the recrystallization kinetics of copper // Scr. Met. – 1988. – V. 22. – P. 235–238.
8. С п и ц ы н В. И., Т р о и ц к и й О. А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
9. С и д о р е н к о в В. В. О механизме текстурирования металлов под действием электрического тока // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308, № 4. – С. 870–873.
10. А . С . № 1770399 / В.В. Сидоренков, С.Л. Тимченко // Б.И. – 1992. – № 39.
11. С а л л и И. В. Кристаллизация сплавов. Киев: Наук. думка, 1974. – 229 с.

Статья поступила в редакцию 21.09.2011

Светлана Леонидовна Тимченко в 1989 г. окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана, в 1994 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 30 научных работ в области физики конденсированного состояния и электромагнитного воздействия на процессы кристаллизации металлов и сплавов.

S.L. Timchenko graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1989 and from the Lomonosov Moscow State University in 1994. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 publications in the field of physics of condensed state and electromagnetic action on processes of crystallization of metals and alloys.