

Влияние электрического тока на дендритную структуру алюминиевого сплава

© С.Л. Тимченко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Обнаружено изменение конфигурации дендритной структуры при кристаллизации алюминиевого сплава под действием тока. Получена экспериментальная зависимость размера дендритной ячейки от силы электрического тока и определен интервал, в котором влияние электрического тока на размер дендритной ячейки является максимальным. В результате анализа условий равновесия жидкой и твердой фаз получено выражение для критического радиуса зародыша при действии тока.

Ключевые слова: электрический ток, сплав, кристаллизация, зародыши, эвтектика, дендритный параметр, твердость.

Введение. При формировании отливок из алюминиевых сплавов с использованием традиционных литейных технологий процесс дендритной кристаллизации сплава является наиболее характерным. Сплавы системы алюминий—кремний, относящиеся к литейным алюминиевым сплавам — силуминам, имеют относительно простую эвтектику. Структура сплава состоит из дендритов α -фазы и эвтектики Al—Si, а также возможных интерметаллидных соединений при наличии примесей Ni, Ti, Cr, Cu и др.

Обобщая различные воззрения на проблему формирования дендритных структур, можно сделать вывод, что параметры дендритов определяются сочетанием исходных физических и концентрационных неоднородностей в кристалле и окружающем расплаве [1].

Процесс формирования дендритов и возможность управления дендритной структурой сплава представляют практический интерес для литейного производства. Способы управления процессом формирования дендритной структуры материала включают использование модификаторов, а также внешних воздействий. Применение внешних энергетических воздействий позволяет изменять кинетику и динамику физического процесса независимо от фазового состояния материала. Одним из эффективных и доступных видов воздействия на объект является действие электрического тока, которое позволяет изменить температуру рекристаллизации жидкого металла [2] и обеспечить формирование необходимых свойств при кристаллизации металла [3]. Однако природа данного воздействия является неоднозначной и включает ряд взаимосвязанных эффектов: выделение теплоты Джоуля — Ленца, пондеромоторное действие силы тока, а при больших

плотностях тока пинч- и скин-эффекты, а также возникновение дополнительных механических напряжений [4].

Экспериментальная часть. Целью данной работы является изучение влияния электрического тока на особенности дендритного строения алюминиевого сплава. При проведении исследований определяли химический состав алюминиевого сплава на атомно-эмиссионном спектрометре с лазерным возбуждением LAES MATRIX. Относительная погрешность метода составляла не более 10...15 %. Химический состав исследуемого сплава (%): 9,28Si и не более 1,7Cu, 1,15Fe, 0,09Ni, 0,1Mg, 0,16Mn, 0,06Cr.

Отливки получали литьем в песчаные формы (ПФ). Температура заливки расплава в форму 770...800 °С, температура формы 20 °С. Форма образца и литниково-питающая система обуславливали минимальную возможность недостаточного питания частей отливки и возникновение ее затрудненной усадки. Исследовали фазовый переход в сплаве при традиционной заливке в ПФ и затвердевании расплава под действием гравитационных сил, а также при пропускании электрического тока.

Пропускание постоянного электрического тока в процессе кристаллизации металла осуществляли на экспериментальной установке [3, 5]. Электрический ток пропускали вдоль оси отливки (рис. 1) на стадиях жидкого, твердожидкого состояния сплава и вплоть до полного затвердевания и охлаждения образца. Применяли воздействие постоянным электрическим током силой $I = 25, 66, 96$ и 140 А.

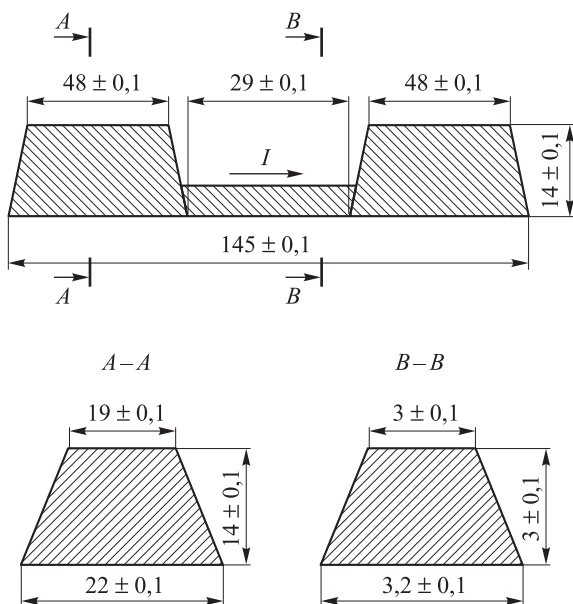


Рис. 1. Геометрия и размеры образца

Микроструктуру материала исследовали на оптическом микроскопе Leika DM ILM. Параметры структуры рассчитывали с помощью компьютерной программы анализа изображений Qwin. Шлифы для анализа структуры и свойств сплава изготавливали из характерных сечений отливки. Поперечные шлифы вырезали из области сечений $A-A$ и $B-B$ (см. рис. 1) перпендикулярно, а продольные — вдоль оси отливки и направления тока. Площадь сечений $S_{A-A} = 287 \text{ мм}^2$, $S_{B-B} = 10,5 \text{ мм}^2$, а их соотношение S_{A-A}/S_{B-B} составляет ≈ 27 . Более подробное описание формы отливки и расположения электродов представлено в работе [3].

Для анализа эффективности применения электрического тока при кристаллизации и количественной оценки его влияния измеряли средний размер дендритного параметра сплава и твердость сплава. Измерения твердости по Бринеллю проводили на твердомере *Wilson Wolpert Universal Testor 930*, погрешность измерений по паспорту прибора составляла 1 %. Параметры воздействия: внешняя нагрузка 62,5 кг; диаметр шарика 2,5 мм; время воздействия 10 с.

Обсуждение результатов эксперимента. Применение электрического тока на этапе кристаллизации активизирует процесс массопереноса в расплаве за счет влияния на электронно-ионные подсистемы сплава [6]. Электрический ток, представляя собой, упорядоченное движение электронов, оказывает влияние на формирование дендритной структуры сплава. Обнаружено изменение конфигурации дендритной структуры и ее частичное разрушение. В структуре появляется тонкодифференцированная эвтектика, не наблюдаются ярко выраженные дендритные ячейки α -твердого раствора. В результате воздействия электрического тока на сплав в процессе кристаллизации изменяется размер дендритной ячейки, увеличивается твердость.

Микроструктура сплава отливок, кристаллизация которых происходила без воздействия электрического тока и при пропускании электрического тока силой 25 и 66 А, приведена на рис. 2. Структура сплава, закристаллизовавшегося без воздействия тока, представляет характерные дендритные ячейки α -твердого раствора и эвтектики. Размер дендритных ячеек — дендритный параметр (ДП) — колеблется от 14,5 мкм в поперечном сечении $B-B$ до 32 мкм в поперечном сечении $A-A$, а пластинчатые эвтектические кристаллы $AlSi$ имеют грубое игольчатое строение в плоскости шлифа (рис. 2, *a*, *б*). Наблюдаемое различие размеров дендритных ячеек связано с различным объемом кристаллизующегося сплава в приведенных сечениях, т. е. с влиянием граничных условий на темп кристаллизации.

На рис. 2, *в*, *г* приведена микроструктура сплава в поперечном сечении $A-A$, кристаллизация которого осуществлена под воздействием постоянного электрического тока силой 25 и 66 А. Значение ДП составило 24 мкм при $I = 25 \text{ А}$ и 20 мкм при $I = 66 \text{ А}$, а твердость

соответственно равна 97 и 101, НВ. Эвтектика имеет более дисперсное строение с характерным изменением протяженности границ между эвтектическими колониями. В отдельных участках можно наблюдать более тонкое дифференцированное строение эвтектики. Анализ показал, что влияние электрического тока на значение ДП в сечении $B-B$ практически отсутствует, а в сечении $A-A$ составляет 20...37 %. Это можно объяснить доминирующим влиянием граничных условий к расположением литниково-питающей системы на формирование кристаллической структуры под действием электрического тока в сечении $B-B$. Наблюдаемый небольшой рост значения ДП для сечения $B-B$ сопровождается разрушением характерной дендритной структуры. Относительное различие значения ДП в поперечных сечениях $B-B$ и $A-A$ без действия тока и при $I = 66$ А составило 71 %, т. е. наибольшие изменения ДП происходят в сечении $A-A$.

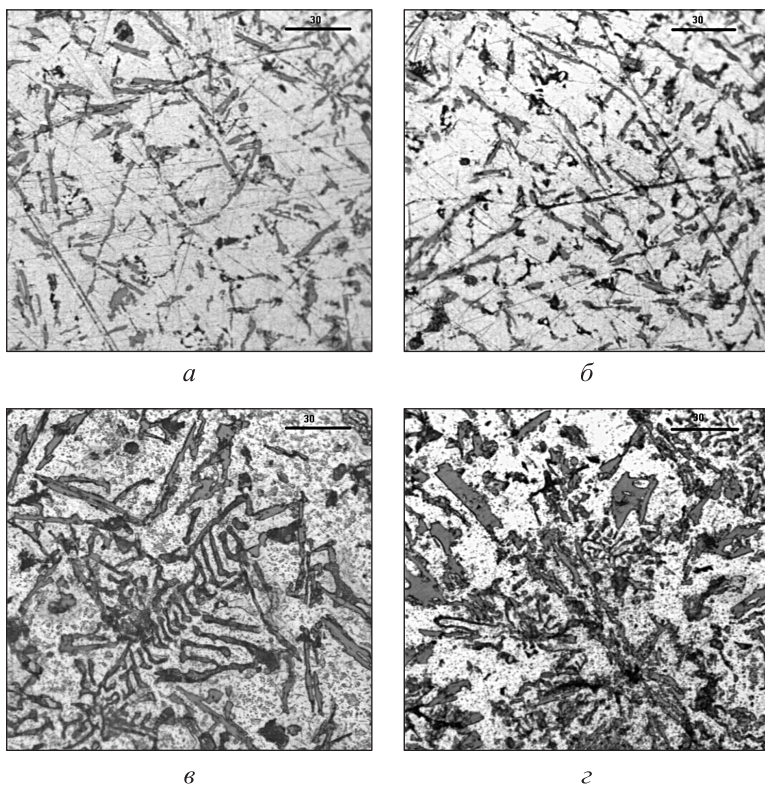


Рис. 2. Микроструктура сплава (поперечные шлифы, $\times 10^3$):
a — $I = 0$, сечение $A-A$, ДП = 32 мкм, 67 НВ; *б* — $I = 0$, сечение $B-B$, ДП = 14,5 мкм, 69 НВ; *в* — $I = 25$ А, сечение $A-A$, ДП = 24 мкм, 97 НВ; *г* — $I = 66$, сечение $A-A$, ДП = 20 мкм, 101 НВ

Микроструктура сплава для продольного сечения $B-B$ при кристаллизации под действием тока 25 и 66 А приведена на рис. 3. Сравнивая микроструктуры на рис. 2 и 3, можно отметить, что при воздействии

тока происходит изменение морфологии дендритной структуры α -твердого раствора. Выявлены области, в которых значение ДП составило 5...8 мкм. Дисперсное строение эвтектики и увеличение ее в структуре сплава, по-видимому, связано с изменением диффузионных потоков в электрическом поле тока, а также влиянием электрического тока на интенсивность образования центров кристаллизации. Диспергирование края эвтектики в α -твердый раствор обуславливает улучшение механических свойств сплава — твердость возрастает.

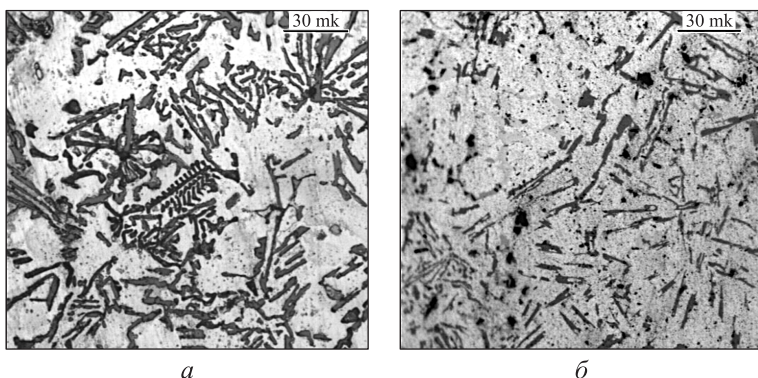


Рис. 3. Микроструктура сплава для сечения $B-B$ (продольные шлифы, $\times 10^3$):

a — $I = 25$ А, ДП = 15 мкм, 97 НВ; b — $I = 66$ А, ДП = 14 мкм, 99 НВ

На рис. 4 представлены зависимости ДП сплава для поперечного (кривая 1) и продольного (кривая 2) шлифов в сечении $A-A$ от силы тока. Зависимости являются нелинейными. Наибольшее влияние тока на значение ДП выявлено для поперечного шлифа. При этом наблюдается диапазон значений тока, в котором его влияние на снижение ДП оказалось наиболее эффективным. Уменьшение значения ДП в сечении $A-A$ для поперечного и продольного шлифов может происходить за счет увеличения интенсивности процесса образования зародышей кристаллизации при неизменных граничных условиях теплоотвода и питания отливки, что эквивалентно операции модифицирования сплава. Небольшое увеличение ДП в сечении $B-B$ может быть связано с дополнительным разогревом данного объема металла током и, как следствие, уменьшением интенсивности зародышеобразования в условиях доминирования влияния границ.

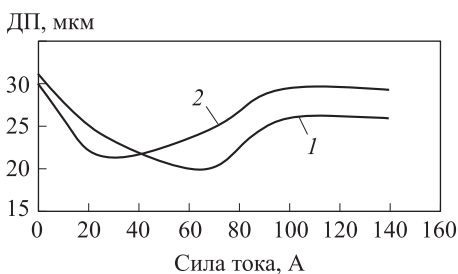


Рис. 4. Зависимость ДП сплава от силы тока для сечения $A-A$:

1, 2 — поперечный и продольный шлифы

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о положительной динамике влияния электрического тока на формирование дендритной структуры сплава при его кристаллизации.

Задача определения скорости роста дендрита в функции степени переохлаждения является актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения. Сложность данной задачи связана с тем, что скорость перемещения кончика дендрита зависит от скорости, с которой отводится теплота в окружающий расплав, а скорость, в свою очередь, зависит от формы, объема и температуры кончика дендрита. Считается [1], что общее переохлаждение окружающего дендрит расплава состоит из трех основных частей:

из разности температур между поверхностью раздела и расплавом вблизи этой поверхности;

из разности между температурами поверхности раздела и равновесной температурой;

из разности между равновесной температурой кончика дендрита и температурой поверхности раздела.

Первая часть определяет движущую силу отвода теплоты от поверхности раздела за счет явления теплопроводности сплава. Вторая часть является движущей силой кинетики процесса, протекающего на поверхности раздела. Третья часть представляет собой силу, обуславливающую увеличение радиуса кривизны дендрита. Поскольку дендритный рост связан с процессом диффузии, при рассмотрении кинетики дендритного роста необходимо учитывать химический состав дендрита и окружающего расплава.

Применим термодинамический подход для анализа равновесия между жидкой и твердой фазами расплава. Данный сплав содержит металлические и неметаллические включения, имеющие определенное сродство с расплавом (расхождение параметров решеток составляет примерно 10...15 % с достаточной степенью смачиваемости) и являющиеся потенциальными центрами кристаллизации. При наличии потенциальных зародышей для начала процесса кристаллизации необходимо относительно небольшое переохлаждение порядка нескольких градусов Цельсия. Жидкая и твердая фазы характеризуются собственной температурной зависимостью свободной энергии на единицу объема. Устойчивость фазы определяется ее свободной энергией. Устойчивой является фаза, свободная энергия которой при температуре, меньшей равновесной температуры, будет наименьшей, и в данном случае это твердая фаза (кристаллическое состояние вещества).

Термодинамический потенциал некоторого объема расплава как сложной системы с неизменным числом частиц можно представить функцией Гиббса [7]:

$$G = U - TS + \sum_i A_i a_i. \quad (1)$$

Здесь U — внутренняя энергия; S — энтропия; T — температура; A_i — обобщенные силы, сопряженные с внешним параметром a_i .

В среде объемом V , находящейся под давлением p , при наличии электрического тока термодинамический потенциал системы будет содержать слагаемое, которое задает электромагнитную энергию в объеме

$$G = U - TS + pV + W_E. \quad (2)$$

Далее будем рассматривать только электрическую энергию. Термодинамические потенциалы системы в жидком и твердом состояниях будут различными. Термодинамический потенциал для жидкого состояния

$$G_L = U_L - TS_L + pV_L + W_{EL}, \quad (3)$$

для твердого состояния

$$G_S = U_S - TS_S + pV_S + W_{ES}. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) p — давление в системе; W_{EL} , W_{ES} — объемные плотности электрической энергии для жидкого и твердого состояний.

В состоянии фазового равновесия $G_L = G_S$ и можно записать

$$\Delta U = U_L - U_S = T(S_L - S_S) + p(V_S - V_L) + \Delta(W_E)_{LS},$$

а при $T = T_E$ (T_E — температура образования эвтектики) приращение энергии Гиббса $\Delta G = G_L - G_S = 0$. Введя энтальпию термодинамической системы $H = U + pV$, получаем

$$T_E(S_L - S_S) = H_L - H_S + \Delta(W_E)_{LS}. \quad (5)$$

В точках вблизи фазового равновесия термодинамической системы изменение термодинамического потенциала — энергии Гиббса — будет иметь вид

$$\Delta G = \Delta H - \frac{T}{T_E} \Delta H - \frac{T}{T_E} \Delta(W_E)_{LS} + \Delta(W_E)_{LS}. \quad (6)$$

Вводя скрытую теплоту плавления $\Delta H = L$ и обозначая разницу температур $\Delta T = T_E - T$ как температуру переохлаждения термодинамической системы, получаем

$$\Delta G = \frac{L}{T_E} \Delta T + \frac{\Delta(W_E)_{LS}}{T_E} \Delta T. \quad (7)$$

При фазовом переходе происходит образование поверхности раздела, поэтому

$$\Delta G = \frac{2\sigma}{r_*}, \quad (8)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; r_* — критический радиус зародыша кристаллизации.

Приравняв выражения (7) и (8), получаем формулу для критического зародыша в условиях равновесной кристаллизации:

$$r_* = \frac{2\sigma T_E}{(L + \Delta(W_E)_{LS})\Delta T}. \quad (9)$$

Разность объемной плотности электрической энергии жидкой и твердой фаз можно определить в виде $\Delta(W_E)_{LS} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_L^2}{2} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_S^2}{2}$,

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; E_L, E_S — напряженности электрического поля в жидкой и твердой фазах.

Из выражения (9) следует, что при действии тока критический радиус зародыша будет уменьшаться, что обеспечивает получение мелкозернистой структуры металла с высоким уровнем механических свойств.

Следовательно, управление процессом зародышеобразования, повышение его интенсивности возможно не только за счет регулирования температурного режима процесса, обеспечивающего необходимую степень переохлаждения сплава [1], но и за счет энергии электрического поля тока. Увеличение притока теплоты изнутри за счет теплоты Джоуля — Ленца позволяет стабилизировать во времени и в объеме состояние зародышей кристаллизации.

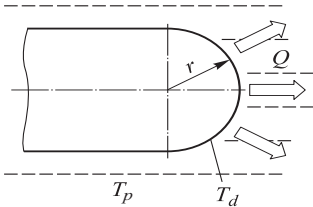


Рис. 5. Схема роста дендрита

Рассмотрим состояние устойчивого роста изотропного дендрита. Пусть конец дендрита, имеющий форму полусферы радиусом r с температурой T_d , находится в расплаве с температурой T_p (рис. 5). Отвод теплоты от полусферы в расплав будет осуществляться через ее поверхность [1]:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 2\pi r k (T_p - T_d), \quad (10)$$

где k — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м·К).

Считая, что теплота выделяется из кристаллизующегося расплава,

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = L\Delta m = L\rho\pi r^2 v, \quad (11)$$

в рамках уравнения теплового баланса из выражений (10) и (11) с учетом формулы (9) получаем скорость перемещения кончика дендрита (скорость роста дендрита):

$$v = \frac{k(L + \Delta(W_E)_{LS})}{L\rho\sigma T_E} (T_E - T_d)(T_p - T_d). \quad (12)$$

Также теплота Джоуля — Ленца, выделяемая в расплаве, будет влиять на количество затвердевшей фазы, а следовательно, на формирование особенностей дендритного строения. Согласно основам традиционной теории затвердевания [1], затвердевание вследствие дендритного роста прекращается как процесс тогда, когда количество выделившейся скрытой теплоты плавления окажется достаточным, чтобы повысить температуру твердой фазы и остаточного расплава до равновесной температуры в данном объеме.

По уравнению теплового баланса для стадии фазового перехода сплава определяют долю затвердевшей фазы в зависимости от степени его переохлаждения [1]:

$$f_s = \frac{2C_L\Delta T}{2L - (C_L - C_S)\Delta T}, \quad (13)$$

где L — скрытая теплота плавления; C_S , C_L — удельные теплоемкости твердой и жидкой фаз; ΔT — начальное переохлаждение.

Оценку количества твердой фазы проводили в приближении независимости величин L , C_S и C_L от температуры и малости ΔT :

$$f_s = \frac{C\Delta T}{L}. \quad (14)$$

Для сплава АК12 [8] при $C = 838$ Дж/(кг·К), $L = 390$ кДж/кг получаем $f_s = 2,15 \cdot 10^{-3} \Delta T$.

Теплота Джоуля — Ленца, выделяемая при кристаллизации под действием электрического тока в объеме проводника, будет суммироваться со скрытой теплотой плавления, выделяемой при фазовом переходе. В результате получаем долю затвердевшей фазы при действии тока:

$$f_s = \frac{C\Delta T}{L} - \frac{j^2 \rho}{L\gamma} \Delta t. \quad (15)$$

Здесь j — плотность тока, А/м²; ρ — удельное электросопротивление, Ом·м; γ — плотность материала, кг/м³; Δt — время воздействия, с.

Теплота, выделяемая при протекании электрического тока в процессе кристаллизации, будет уменьшать количество затвердевшей фазы в данном объеме. Регулирование током доли твердой фазы позволит управлять скоростью затвердевания и, как следствие, параметрами структуры сплава.

Плотность тока, при которой его влияние на уменьшение образования доли твердой фазы будет сравнимым с влиянием скрытой теплоты плавления (кристаллизации), в рамках теории теплового влияния электрического тока можно определить соотношением

$$j_{\text{кр}} \geq \sqrt{\frac{C\gamma}{\rho} \frac{\Delta T}{\Delta t}}. \quad (16)$$

Для сплава АК12, используя справочные данные для C , γ , ρ [8], в соответствии с выражением (4) получаем $j_{\text{кр}} \approx 6,4 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\Delta T}{\Delta t}}$ А/м².

В эксперименте максимальная плотность тока в сечении $B-B$ составила $1,33 \cdot 10^7$ А/м².

Заключение. Результаты исследований показали, что электрический ток влияет на формирование дендритной структуры алюминиевого сплава. Пропускание электрического тока при кристаллизации сплава приводит к уменьшению размера дендритной ячейки и формированию тонкодифференцированной эвтектики в сплаве. Регулируя приток теплоты изнутри за счет теплоты Джоуля — Ленца, можно стабилизировать во времени и в объеме состояние зародышей кристаллизации, т. е. изменять интенсивность зародышеобразования в объеме. Применение данного вида воздействия на этапе фазового перехода позволит направленно влиять на динамику процесса формирования кристаллической структуры, управлять формированием свойств материала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чалмерс Ч. *Теория затвердевания*. Москва, Металлургия, 1968, 288 с.
- [2] Conrad H., Karam N., Mannan S., Sprecher A.F. Effect of Electric Current Pulses on The Recrystallization Kinetics of Copper. *Scr. met.*, 1988, vol. 22, pp. 235–238.
- [3] Тимченко С.Л. Исследование кристаллизации сплава под действием электрического тока. *Расплавы*, 2011, № 4, с. 53–61.
- [4] Спицын В.И., Троицкий О.А. *Электропластическая деформация металлов*. Москва, Наука, 1985, 160 с.
- [5] Задорожный Н.А., Макеев В.П., Рыбкин В.А., Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. *Способ управления процессом формирования фасонных отливок*. Пат. России 2220816С2 МПК7 В22D 27/02. Российская Федерация, 2004, бюл. № 1.

- [6] Фикс В.Б. *Ионная проводимость в металлах и полупроводниках*. Москва, Наука, 1969, 296 с.
- [7] Най Дж. *Физические свойства кристаллов*. Москва, Мир, 1967, 385 с.
- [8] Строганов Г.Б., Ротенберт В.А., Гершман Г.Б. *Сплавы алюминия с кремнием*. Москва, Metallurgia, 1977, 272 с.

Статья поступила в редакцию 05.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Тимченко С.Л. Влияние электрического тока на дендритную структуру алюминиевого сплава. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/903.html>

Тимченко Светлана Леонидовна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физика металлов. Занимается исследованием влияния электромагнитных воздействий на процесс кристаллизации металлов и сплавов. e-mail: svtimchenko@yandex.ru