

А. В. Иванов

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ЭЛЕКТРОТОКОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРОДЫШЕЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ОБЪЕМЕ РАСПЛАВА

Теоретически установлены основные характеристики кондукционной электротокковой обработки расплавов, которые позволяют наиболее эффективно инициировать процесс перераспределения зародышей и растущих кристаллов в объеме расплава под действием постоянного и импульсного тока. Проведена экспериментальная проверка полученных результатов.

Ключевые слова: кондукционная электротокковая обработка, зародыш, расплав, постоянный ток, импульсный ток.

Теоретично встановлено основні характеристики кондукційної електротоккової обробки розплавів, які дозволяють найбільш ефективно ініціювати процес перерозподілу зародків і зростаючих кристалів в об'ємі розплаву під дією постійного та імпульсного струму. Проведено експериментальну перевірку отриманих результатів.

Ключові слова: кондукційна електрострумова обробка, зародок, розплав, постійний струм, імпульсний струм.

Theoretically, it was established the basic characteristics of the conductive electro treatment of melts, which allow the most effective to initiate a process of redistribution of nuclei and growing crystals in the melt volume under the influence of continuous and pulsed current. The experimental verification of the results was carried out also.

Key words: conductive electric current treatment, nucleation, melt, direct current, pulse current.

Введение

Влияние воздействий на расплавы внешними физическими полями в современных процессах литья являются, в большинстве случаев, одним из основных инструментов для получения качественных отливок и новых материалов [1]. В металлургии и машиностроении приложении этого подхода можно разбить на два основных направления: непосредственно получение металлов, сплавов и отливок с заданной структурой и свойствами; получение новых материалов, таких как: металлокерамика, наноматериалы и материалы с недендритной структурой и др. [2-4].

Одним из перспективных методов воздействия на расплавы с целью получения качественных отливок является кондукционная электротокковая обработка (КЭТО), при которой непосредственно пропускаемый через объект обработки электрический ток является тем инструментом, который, воздействуя на расплав в жидком, жидко-твердом, твердожидком и твердом состояниях, приводит к положительным результатам [5-7]. В этом направлении активно развиваются методы обработки постоянным, переменным и импульсным электрическим током. Каждый такой вид обработки имеет как общий, для всех таких методов, так и свой уникальный набор функциональных возможностей и управляющих параметров [8].

Процессы кристаллизации и твердения, в большинстве случаев, начинаются на стенках формы за счет градиента температур расплава и окружающей среды. Поэтому в качестве одного из рабочих механизмов измельчения структуры отливки из обработанного электрическим током металла был предложен механизм «дождя

кристаллов», то есть отрыва и переноса образовавшихся на периферии зародышей твердой фазы в объем расплава [9-12]. Однако, несмотря на кажущуюся простоту, теоретическое описание данного механизма и сопоставление результатов теоретических и экспериментальных данных не всегда однозначно, а, зачастую, и

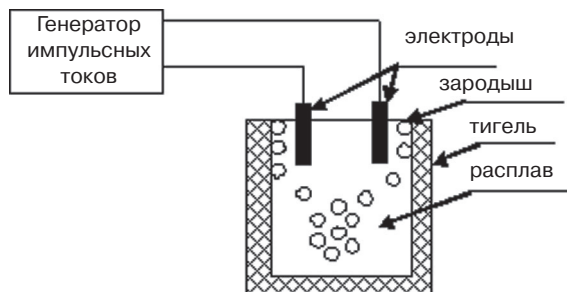


Рис. 1. Схема кондукционной обработки расплава в температурном интервале кристаллизации

противоречиво. Например, в довольно распространенной за счет своей простоты и технологичности схеме воздействия, приведенной на рис. 1, авторами работ [11, 12] не получены научно-обоснованные рекомендации по выбору целесообразного диапазона изменения таких электро-технологических параметров, как глубина погружения электродов, форма импульса тока, частота их следования, сила (амплитуда) тока.

Поэтому нет конкретных предложений для применения данного эффекта «дождя кристаллов» при КЭТО в литейном производстве.

Целью данной работы было исследовать влияние электротехнологических параметров кондукционной электротоковой обработки расплавов силуминов на возможность миграции зародышей твердой фазы в объеме расплава.

Теоретическое моделирование

Результирующее силовое воздействие на образующийся зародыш (растущий кристалл) на глубине h от поверхности расплава, способствующее его отрыву от стенки формы, при схеме обработки, показанной на рис. 1, можно записать согласно рис. 2, а в виде:

$$F_{\text{рез}} = F_1 - F_2 - F_j - F_p \geq 0, \quad (1)$$

где F_1 и F_2 – горизонтальные проекции электромагнитных сил; F_j – горизонтальная проекция силы поверхностного натяжения; F_p – горизонтальная проекция силы, действующей на зародыш со стороны расплава.

В общей постановке, не конкретизируя режим пропускания тока, электромагнитные силы F_1 и F_2 можно рассчитать с помощью силы Лоренца, согласно расчетной схеме на рис. 2, б. Необходимым является условие, что боковые поверхности электродов изолированы и стекание тока происходит только с торцов.

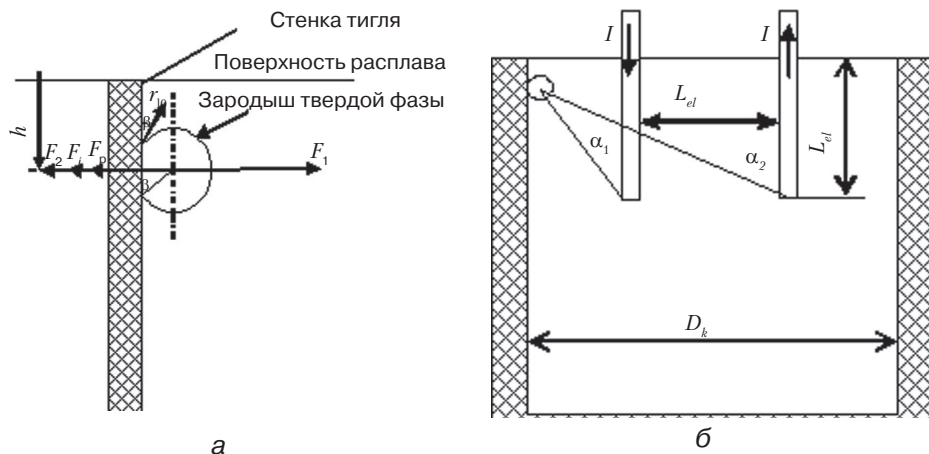


Рис. 2. Силы, действующие на зародыш и расчетная модель: а – силы, действующие на образующийся зародыш; б – схема для расчета электродинамических сил, действующих на зародыш

$$F_1 = \frac{\mu_0 \cdot I^2 \cdot h_{el} \cdot \cos \alpha_1}{2 \cdot \pi \cdot (D_k - L_{el})} = \frac{\mu_0 \cdot I^2 \cdot h_{el}^2}{2 \cdot \pi \cdot (D_k - L_{el}) \cdot \sqrt{\left(\frac{D_k - L_{el}}{2}\right)^2 + h_{el}^2}}, \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{\mu_0 \cdot I^2 \cdot h_{el} \cdot \cos \alpha_2}{2 \cdot \pi \cdot (D_k + L_{el})} = \frac{\mu_0 \cdot I^2 \cdot h_{el}^2}{2 \cdot \pi \cdot (D_k + L_{el}) \cdot \sqrt{\left(\frac{D_k + L_{el}}{2}\right)^2 + h_{el}^2}}, \quad (3)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{h_{el}}{\sqrt{\left(\frac{D_k - L_{el}}{2}\right)^2 + h_{el}^2}}, \quad (4)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{h_{el}}{\sqrt{\left(\frac{D_k + L_{el}}{2}\right)^2 + h_{el}^2}}. \quad (5)$$

где I – сила тока, А; h_{el} – глубина погружения электродов, м; D_k – диаметр ковша (тигля) с расплавом, м; L_{el} – расстояние между электродами, м; μ_0 – магнитная постоянная, $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м.

Воздействие силы давления на зародыш со стороны расплава описывается выражением [12]:

$$F_p = \pi \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot r^2 \cdot \sin^2 \beta, \quad (6)$$

где r – радиус зародыша, м; ρ – плотность зародыша, кг/м³; β – краевой угол, град.

Значение краевого угла между ковшом (тиглем) или песчано-глинистой формой и зародышем, как и расплавом на основе алюминия, можно принять $\beta \approx 130^\circ$, меньше которого, как известно [2, 3] происходит проникновение расплава в поры стенки. Это справедливо для ковшей, тиглей и форм, изготовленных для плавки, разливки и кристаллизации алюминиевых сплавов. Силу поверхностного натяжения между тиглем и зародышем можно выразить как [12]:

$$F_j = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta_H \cdot (1 + \cos \beta), \quad (7)$$

где η_H – поверхностное натяжение «форма-расплав», Дж/м².

Сделаем некоторые оценки для КЭТО постоянным током: пусть высота тигля равна его диаметру $D_k = 100 \cdot 10^{-3}$ м; $I =$ от 0 до 50 А; $h_{el} = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{el} = 40 \cdot 10^{-3}$ м.

Результаты расчета приведены на рис. 3.

Из анализа результатов, приведенных на рис. 3, следует, что условие (1) начинает выполняться уже с величины тока ≥ 5 А. Хотя в работах [13, 14], при соизмеримых размерах формы с металлом, для обработки используются значения постоянного тока в разы больше. Это, помимо увеличения роли электровихревых течений, приводит к «размытию» моделируемых эффектов и дает зачастую нестабильный или неожиданный результат. Так, например, в работе [15] показано, что при определенных

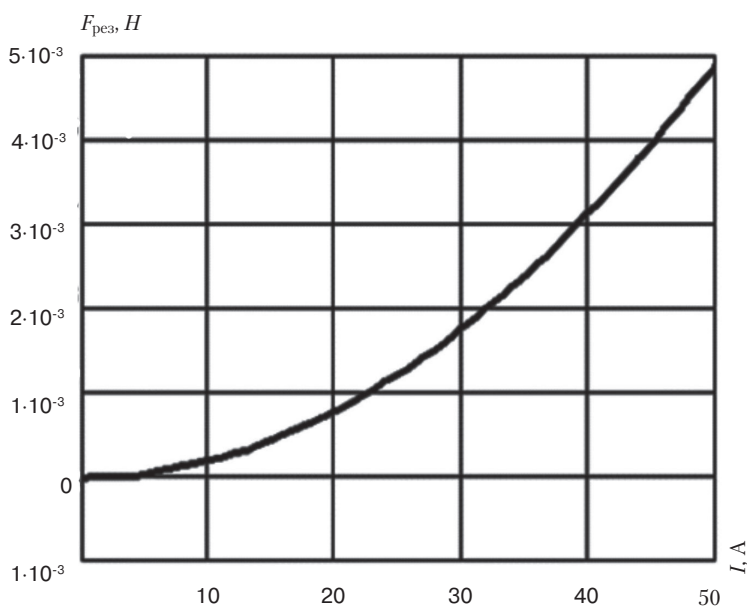


Рис. 3. Зависимость изменения результирующей силы, воздействующей на зародыш, находящийся на стенке ковша от силы тока

значениях силы постоянного тока происходит превалирующее термическое нагружение расплава. К тому же, такой подход, направленный исключительно на увеличение силы тока, нерационален экономически и не позволяет выдать конкретные рекомендации для разработки эффективных технологических процессов КЭТО. Что, в свою очередь, может быть напрямую связано с нерациональным выбором таких важных технологических параметров, как глубина погружения электродов и расстояние между ними, а также с использованием неизолированной поверхности электродов, когда ток течет в основном только в приповерхностном слое расплава, как, например, в работе [13].

Проанализируем влияние таких геометрических параметров, как расстояние между электродами и глубина их погружения.

Начальными условиями для расчета были: $I = 50 \text{ А}$; $h_{el} =$ от 0 до $90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; высота формы равна его диаметру $D_k = 100 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $L_{el} =$ от 10 до $90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Результаты расчетов приведены на рис. 4 и рис. 5.

Из представленных на рис. 4 и 5 данных можно сделать вывод, что малое заглубление электродов, до 10 мм, существенно снижает силовое воздействие на зародыш, однако, после глубины 20 мм, что составляет 1/5 глубины ковша, достигает практически постоянной величины и, можно сказать, не меняется. Увеличение же расстояния между электродами оказывает изменение воздействия на зародыш в 20 раз, поэтому можно рекомендовать наиболее широко разносить электроды в расплаве при его электротокковой обработке. Заметим, что для других значений I, h_{el}, L_{el}, D_k получаемые зависимости (рис. 4, 5) качественно не меняются.

Полученные результаты, в данной постановке задачи, можно рекомендовать для разработки технических и методических рекомендаций по выбору наиболее рациональных значений соотношений силы тока, глубины погружения электродов, диаметра ковша и расстояния между электродами при опытно-лабораторной апробации результатов с целью дальнейшего промышленного использования.

При КЭТО в импульсном режиме дополнительно реализуется ряд таких дополнительных электротехнологических параметров обработки, как длина импульса, частоты следования импульсов ($f_{\text{сн}}$), форма импульса и т. д. Поэтому для

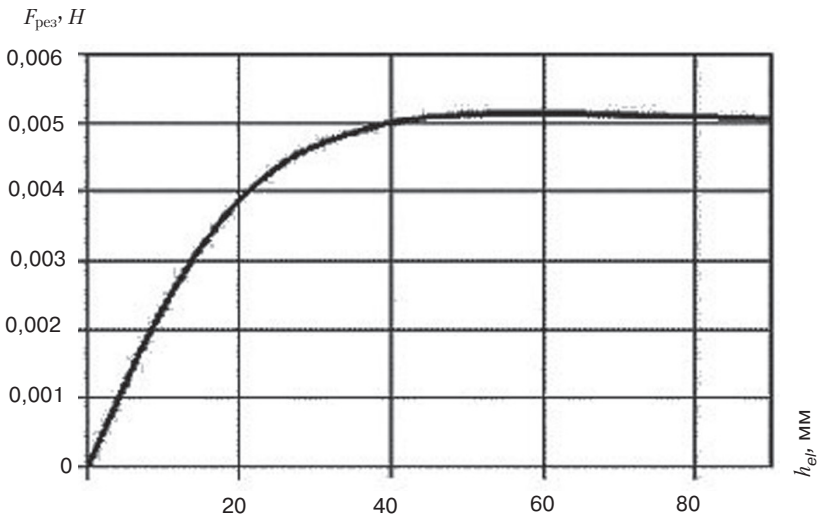


Рис. 4. Зависимость изменения результирующей силы, действующей на зародыш, находящийся на стенке ковша, от глубины погружения электродов (расстояния между электродами 40 мм)

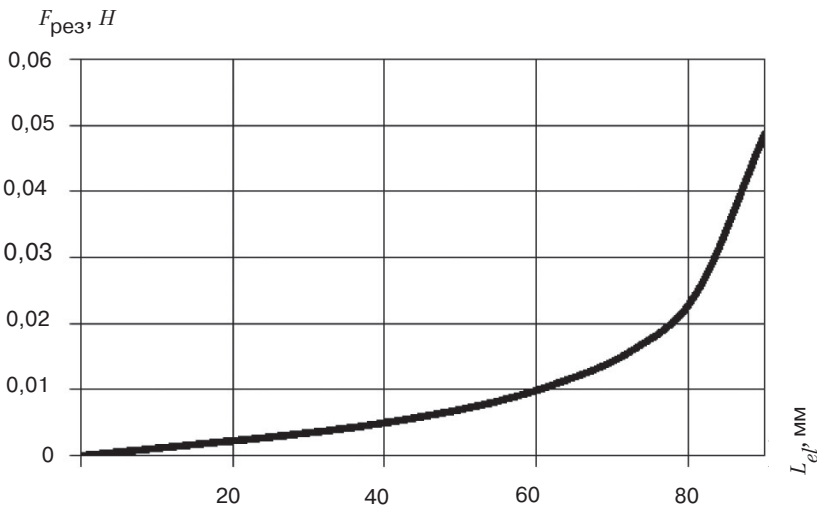


Рис. 5. Зависимость изменения результирующей силы, действующей на зародыш, находящийся на стенке ковша, от расстояния между электродами (глубина погружения электродов 40 мм)

качественного описания процесса воздействия на зародыш твердой фазы в представленной модели целесообразно воспользоваться понятием среднеквадратичного значения тока (I_{rms}). Промоделируем как частота следования импульсов и форма импульса, характерная для КЭТО, оказывает влияние на результирующую силу, действующую на частицу.

Рассмотрим импульсный ток в виде униполярных импульсов в форме одной полуволны синусоиды:

$$I_1(t) = I_m \cdot \sin(\pi \cdot t / \tau_{и}), \quad (8)$$

где I_m – амплитудное значение тока, А; $\tau_{и}$ – длительность импульса.

Получение и обработка расплавов

И в форме колебательного биполярного импульса (затухающей синусоиды):

$$I_2(t) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T) \cdot e^{-\delta t}, \quad (9)$$

где T – период импульса тока, с; δ – декремент колебаний.

Такие импульсы широко используются для КЭТО, в частности авторами работ [12, 13, 16, 17, 18, 19].

Среднеквадратичное значение тока определяется выражением:

$$I_{rms} = \sqrt{f_{сд} \cdot \int_0^{\tau} I_i^2(t) dt}, \quad (10)$$

где $I_i(t)$ – функция тока от времени ($i = 1; 2$).

Зададим начальные данные для расчета: $T = 20$ мкс; $\tau = \tau_{и} = T/2 = 10$ мкс ($i = 1$); $\tau = 2,5 \cdot T$ ($i = 2$); $I_m = 400$ А; $\delta = 5 \cdot 10^4$ (что соответствует длине импульса $2,5 \cdot T$ для затухающей синусоиды); $f_{сд}$ – от 0 до 1600 Гц.

Результаты расчетов представлены на рис. 6.

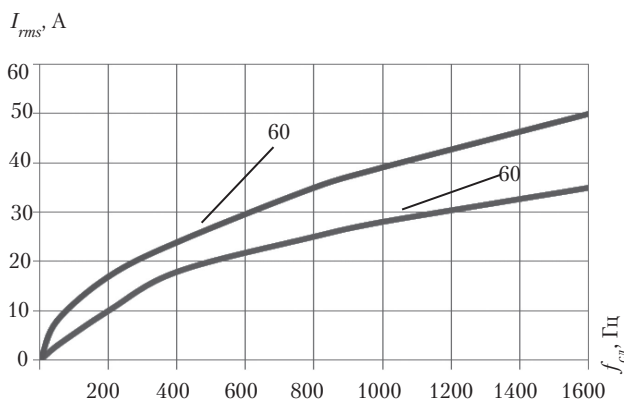


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного (действующего) значения тока от частоты следования импульсов (1 – униполярный импульс; 2 – биполярный импульс)

Таким образом, анализируя полученные результаты (рис. 6), можно сказать, что с точки зрения реализации «дождя кристаллов» при обработке расплава импульсами тока в температурном интервале кристаллизации предпочтительно использование биполярных колебательных импульсов. Диапазон частот униполярных и биполярных колебательных импульсов порядка единиц килогерц с пиковой амплитудой до 1000 А довольно просто реализуется на современном этапе развития импульсной техники. Это, как и в случае обработки постоянным током, позволяет разрабатывать эффективные технологические решения для КЭТО расплавов и дает широкие возможности по экспериментальной проверке и анализу полученных данных.

Экспериментальное моделирование

Для экспериментальной проверки полученных теоретических результатов использовали один из наиболее распространенных в литейном производстве алюминиевый сплав АК7 с химическим составом (в %мас.): Mg (от 0,2 до 0,55); Si (от 6,0 до 8,0); Mn (от 0,2 до 0,6); Fe (до 1); примеси Cu (до 1,5); Zn (до 0,5); Ni (до 0,3), международный принятый аналог – сплав А357 (ASTM В 179-92а, США). Размеры тигля с расплавом были полностью аналогичны тем, что использовали при численном моделировании. Температура выплавки составляла 750 °С, которую контролировали с помощью созданного на базе измерителя регулятора ОВЕН

Получение и обработка расплавов

TRM202 термографического комплекса с передачей данных на персональный компьютер. После расплавления в печи сопротивления расплав извлекали и обрабатывали в форме по схеме, приведенной на рис. 1, до температуры $T_p \approx 585^\circ\text{C}$. Также выплавляли контрольный образец, который не подвергали электротокковой обработке, но выдерживали вне печи аналогично обработанному металлу. Далее вырезали темплеты для исследований с применением методов оптической микроскопии. Режимы электротоккового воздействия приведены в таблице.

Фотографии образцов приведены на рис. 7.

Режимы обработки

| Номер образца | Режим тока | Амплитуда тока, А | Частота следования импульсов, Гц | Размер α -ячейки, мкм | Размер частиц Si в эвтектике $\alpha + \text{Si}$, мкм |
|---------------|----------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------|---|
| 0 | без тока | – | – | 40 | 7 |
| 1 | постоянный ток | 10 | – | 42 | 3 |
| 2 | постоянный ток | 20 | – | 32 | 2.4 |
| 3 | постоянный ток | 30 | – | 26 | 2.4 |
| 4 | постоянный ток | 50 | | 40 | 6 |
| 5 | импульсный ток | 800 | 40 | 29 | 3 |
| | | $I_{rms} = 22\text{A}$ | | | |
| 6 | импульсный ток | 600 | 100 | 34 | 2,5 |
| | | $I_{rms} = 26\text{A}$ | | | |

Приведенные на рис. 7 и в табл. 1 результаты позволяют утверждать, что обработка постоянным и импульсным током при соблюдении условия $I = I_{rms}$ (образцы №2, №3, №5 и №6) дает практически одинаковый положительный результат, что подтверждают полученные теоретические положения. Наблюдается тенденция измельчения структурных составляющих отливки при увеличении интенсивности воздействия. Так, после электротокковой обработки микрозерно уменьшается на 15-35 %, практически в 2 раза уменьшается размер частиц кремния в эвтектике по сравнению с контрольным образцом (образец № 0). Однако, как было качественно описано ранее, получен эффект переобработки расплава (образец № 4) при силе тока 50 А. В данном образце наблюдается увеличение зерна и размера частиц кремния в эвтектике практически до уровня контрольного образца. Таким образом можно заключить, что прямое увеличение энергетических параметров при КЭТО не ведет к пропорциональному положительному эффекту, и не рационально с технико-экономической точки зрения, а существует некий оптимальный диапазон таких параметров для конкретного вида литейной технологии.

Выводы

- В работе показана принципиальная возможность управления иницированием процесса мигрирования зародышей твердой фазы в расплавах под действием постоянного и импульсного тока.

- Получены зависимости для амплитуды результирующего воздействия на зародыш от силы тока, расстояния между электродами, глубины их погружения, формы импульса, частоты следования импульсов. Установлено, что положитель-

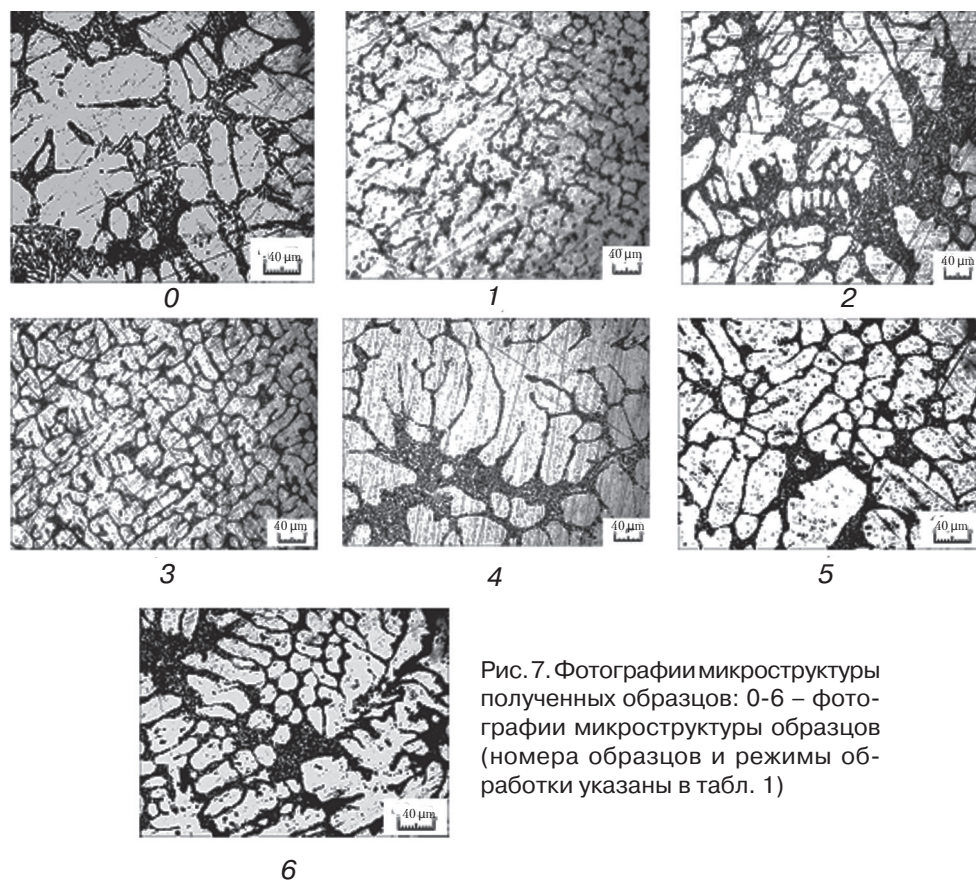


Рис. 7. Фотографии микроструктуры полученных образцов: 0-6 – фотографии микроструктуры образцов (номера образцов и режимы обработки указаны в табл. 1)

ный эффект при обработке расплавов силуминов должен наблюдаться при силе тока больше 5 А. Установлено, что изменение глубины погружения больше 1/5 от высоты расплава не оказывает влияния на результирующее усилие, действующее на зародыш, увеличение расстоянием между электродами практически до стенки формы позволяет увеличить силу воздействия до 20 раз. Установлено влияние частоты следования импульсов на силу воздействия и доказано, что колебательный режим импульса тока предпочтительнее униполярного.

● Полученные в работе теоретические результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований и могут быть рекомендованы для проектирования и разработки технологий кондукционной электротокковой обработки расплавов силуминов.



Список литературы

1. *Jie Wanqi*. Progress of solidification researches and the applications in materials processing / Wanqi Jie // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2001. –17(05). – P. 575- 576.
2. *Гуляев, Б. Б.* Теория литейных процессов, Учебное пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 214 с.
3. *Ефимов В. А.* Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
4. *Найдек В. Л.* Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового

- использования / В. Л. Найдек // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя: Сб. научн. трудов. – Киев. Наукова думка, 1998. – С. 133-155.
5. Таран Ю. Н. Влияние обработки расплава электрическим током на морфологию фаз в сложнолегированных силуминах / Ю. Н. Таран, А. Г. Пригунова, Е. Н. Казимилова // Металлургия и коксохимия. – 1987. – № 92. – С. 67-70.
 6. Деев В.Б. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо / В. Б. Деев, И. Ф. Селянин, Н. В. Башмакова // Литейщик России. – 2007. – № 8. – С. 12-15.
 7. Chunyan Ban. Influence of pulse electric current on solidification structure of Al-Si alloy / Chunyan Ban, Yi Han, Qixian Ba, Jianzhong Cui // Electromagnetic Processing of Material. – 2007. – № 1. – P. 34-37
 8. Иванов А. В. Электротоксовая обработка жидких и кристаллизующихся сплавов в литейных технологиях / А. В. Иванов, А. В. Синчук, В. Н. Цуркин // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 5. – С. 89-98.
 9. Иванцов Г. П. К вопросу о возможности “дождя” кристаллов в стальном слитке / Г. П. Иванцов // Сталь. – 1952. – № 10. – С. 922-931.
 10. Conrad H., Guo Z., Sprecher A. F. Effect of electropulse duration and frequency on grain growth in Cu / Conrad H., Guo Z., Sprecher A. // Scripta Metallurgica et Materialia. – 1990. – № 24. – P. 359-362.
 11. Rongshan, Q. Solidification under electropulsing / Q. Rongshan // International Journal of Cast Metal Research. – 2007. – Vol. 25, № 7. – P. 92-98.
 12. Jingang Qi. A Model Study for the electric pulse frequency effects on the solidification behavior of Al- Cu 5% alloy / Qi Jingang, Li Yang, S. A Tukur, Zhao Zuofu, Wu Di, Dai Shan, Wang Jianzhong // INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH. – 2014. – N 9(3). – P. 267-234.
 13. Guangming XU. Effect of electric current on the cast micro-structure of Al-Si alloy / Guangming XU, Jiawei ZHENG, Yong LIU, Jianzhong CUI // China foundry. – vol. 2. (N3). – 2005. – P.171-175.
 14. Тимченко С. Л. Влияние электрического тока на структуру и свойства алюминиевого сплава / С. Л. Тимченко, Н. А. Задорожный, Л. И. Кобелева // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 6. – С. 82-87.
 15. Цуркин В. Н. Электротоксовое термостатирование расплава / В. Н. Цуркин, С. С. Череповский, А. В. Иванов // Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия. 2014»: Запорожье, 2014. – С. 254-256.
 16. Цуркин В. Н. Кондукционная электротоксовая обработка расплава сплава А390 / В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, Н. А. Федченко, С. С. Череповский, Н. А. Васянович, М. Л. Фещук // Процессы литья. – 2014. – № 6. – С. 32-40.
 17. Цуркин В. Н. Кондукционная электротоксовая обработка расплава сплава А390 в комплексе с модификаторами / В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, Н. А. Федченко, С. С. Череповский, Н. А. Васянович, М. Л. Фещук // Процессы литья. – 2015. – № 1. – С. 70-76.
 18. Пат. № 110555 Україна, МПК В22D27/02. Спосіб обробки розплаву заевтектичного силуміну / В. М. Цуркін, А. В. Сінчук, Н. А. Федченко, А. В. Иванов, Я. Ю. Дмитришина, М. Л. Фещук, С. С. Череповський, М. К. Гумененко ; заявник та патентовласник Ін-т імпульсних процесів і технологій НАН України. – №201406721; заявл. 16.06.2014; опубл. 12.01.2016, Бюл. №1.
 19. Пат. № 103399 Україна, МПК В22D27/02. Спосіб обробки розплаву заевтектичного силуміну / В. М. Цуркін, Н. А. Федченко, А. В. Иванов, Я. Ю. Дмитришина, М. Л. Фещук, С. С. Череповський; заявник та патентовласник Ін-т імпульсних процесів і технологій НАН України. – №201506877; заявл. 10.07.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. №23.



References

1. Wanqi J., Mater J. (2001). Progress of solidification researches and the applications in materials processing. Sci. Technol., 17(05), pp. 575- 576. [in English].
2. Guliaev B. B. (1976). Teoriia liteinykh protsessov. [Theory of casting processes]. Leningrad: Mashinostroenie. [in Russian].

3. Efimov V. A., El'darkhanov A. S. (1995). Fizicheskie metody vozdeistviia na protsessy zatverdevaniia splavov. [Physical methods of influence on the solidification process of alloys]. Moscow: Metallurgiiia. [in Russian].
4. Naidek V. L. (1998). Protsessy vneagregatnoi obrabotki metallicheskih rasplavov massovogo ispol'zovaniia. [The processes in the treatment of metal melts nonaggregate mass use]. Suchasne materialoznavstvo HHI storichchia: Kiev: Naukova dumka, pp. 133-155. [in Russian].
5. Taran Yu. N., Prigunova A. G., Kazimirova E. N. (1987). Vliianie obrabotki rasplava elektricheskim tokom na morfologiiu faz v slozhnolegirovannykh siluminakh. [Influence of melt processing of electric shock on the morphology of the phases in the complex-silumin]. Metallurgiiia i koksokhimiia, №92, pp. 67-70. [in Russian].
6. Deev V. B., Selianin I. F., Bashmakova N. V. (2007). Vliianie elektricheskogo toka na kristallizaciiu aliuminievykh splavov, sodержashhikh zhelezo. [Influence of electric current to the crystallisation of aluminum alloys containing iron]. Liteishnik Rossii. №8, pp. 12-15. [in Russian].
7. Chunyan Ban, Yi Han, Qixian Ba, Jianzhong Cui. (2007). Influence of pulse electric current on solidification structure of Al-Si alloy. Electromagnetic Processing of Material, №1, pp. 34-37. [in English].
8. Ivanov A. V., Sinchuk A. V., Tsurkin V. N. (2011). Elektrotokovaia obrabotka zhidkikh i kristallizuiushchikhsia splavov v liteinykh tekhnologiiakh. [Electro treatment of liquid and crystallized alloys in casting technology]. Elektronnaia obrabotka materialov, №5, pp. 89-98. [in Russian].
9. Ivantsov G. P. (1952). K voprosu o vozmozhnosti "dozhdiia" kristallov v stalnom slitke. [On the possibility of "rain" of crystals in the steel strip]. Stal, №10, pp. 922-931. [in Russian].
10. Conrad H., Guo Z., Sprecher A. F. (1990). Effect of electropulse duration and frequency on grain growth in Cu. Scripta Metallurgica et Materialia, №24, pp. 359-362. [in English].
11. Rongshan, Q. (2007). Solidification under electropulsing. International Journal of Cast Metal Research, vol. 25, №7, pp. 92-98. [in English].
12. Jingang Qi., Yang Li, Tukur S. A., Zuofu Zhao, Di Wu, Shan Dai, Jianzhong Wang. (2014). A Model Study for the electric pulse frequency effects on the solidification behavior of Al- Cu 5% alloy. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH, № 9 (3), pp. 267-234. [in English].
13. Guangming XU, Jiawei ZHENG, Yong LIU, Jianzhong CUI. (2005). Effect of electric current on the cast micro-structure of Al-Si alloy. China foundry, vol. 2, (№3), pp.171-175. [in English].
14. Timchenko S. L., Zadorozhnyi N. A., Kobeleva L. I. (2011). Vliianie elektricheskogo toka na strukturu i svoistva aliuminieвого splava. [Effect of electric current on the properties of aluminum alloy]. Fizika i khimiia obrabotki materialov, №6, pp. 82-87.
15. Tsurkin V. N., Cherepovskii S. S., Ivanov A. V. Elektrotokovoe termostatirovanie rasplava. [Electro-shock melt temperature control]. Materialy lubileinoi X Mezhdunarodnoi na-uchno-prakticheskoi konferentsii «Lite. Metallurgiiia. 2014»: Zaporozhe, pp. 254-256.
16. Tsurkin V. N., Ivanov A. V., Fedchenko N. A., Cherepovskii S. S., Vasianovich N. A., Feshchuk M. L. (2014). Konduktsionnaia elektrotokovaia obrabotka rasplava splava A390. [Convection electro-current alloy melt processing A390]. Protsessy litia, №6, pp. 32-40.
17. Tsurkin V. N., Ivanov A. V., Fedchenko N. A., Cherepovskii S. S., Vasianovich N. A., Feshchuk M. L. (2015). Konduktsionnaia elektrotokovaia obrabotka rasplava splava A390 v komplekse s modifikatorami. [Convection electrocurrent alloy melt processing A390 in combination with modifiers]. Protsessy litia, №1, pp. 70-76.
18. Pat. № 110555 Ukraine, MPK B22D27/02. Sposib obrobky rozplavu zaevtektichnoho syluminu. [A method of processing molten eutectic silumin]. Tsurkin V. M., Sinchuk A. V., Fedchenko N. A., Ivanov A. V., Dmytryshyna Ya. Yu., Feshchuk M. L., Cherepovs'kyi S. S., Humenenko M. K. Zaiavnyk ta patentovlasnyk In-t impul'snykh protsesiv i tekhnologii NAN Ukrainy. №201406721; 16.06.2014; publ. 12.01.2016, Bull. №1.
19. Pat. № 103399 Ukraine, MPK B22D27/02. Sposib obrobky rozplavu zaevtektichnoho syluminu. [A method of processing molten eutectic silumin]. Tsurkin V. M., Fedchenko N. A., Ivanov A. V., Dmytryshyna Ya. Yu., Feshchuk M. L., Cherepovs'kyi S. S. Zaiavnyk ta patentovlasnyk In-t impul'snykh protsesiv i tekhnologii NAN Ukrainy. №201506877; 10.07.2015; publ. 10.12.2015, Bull. №23.

Поступила 09.11.2016