

С. С. Череповский, А. В. Иванов

## ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

*Показано методами математического моделирования и экспериментально, что варьирование частотных параметров импульса разрядного тока позволяет существенно расширить функциональные возможности и повысить эффективность магнитно-импульсной обработки расплавов.*

**Ключевые слова:** расплав, магнитно-импульсная обработка, численное моделирование, электромагнитное поле, электродинамическое воздействие.

*Показано методами математичного моделювання і експериментально, що варіювання частотних параметрів імпульсу розрядного струму дозволяє суттєво розширити функціональні можливості і підвищити ефективність магнітно-імпульсної обробки розплавів.*

**Ключові слова:** розплав, магнітно-імпульсна обробка, чисельне моделювання, електромагнітне поле, електродинамічний вплив.

*It was showing the methods of mathematical modeling and experimental, that the variation frequency of the discharge current pulse parameters can significantly extend the functionality and increase the effectiveness of magnetic-pulse treatment of melts.*

**Keywords:** fusion, magnetic-pulse treatment, numerical design, electromagnetic field, electrodynamic influence.

Обработка расплавов электромагнитным полем известна давно. Одним из относительно новых методов в этом направлении является метод магнитно-импульсной обработки (МИО) расплавов. Его эффективность подтверждена рядом инициативных экспериментальных исследований [1-7]. Вместе с тем, современные тенденции развития литейного производства постоянно выдвигают новые требования к экономическим, экологическим и эргономическим показателям технологий МИО расплавов. Удовлетворить эти требования зачастую не удаётся из-за отсутствия научно-обоснованных подходов к выбору параметров воздействия, проектированию оборудования для магнитно-импульсной обработки жидких и кристаллизующихся металлов и сплавов, которые отличаются от аналогичного принципа воздействия на такие сплавы в твёрдом состоянии. Данные обстоятельства существенно сужают область применения метода и ограничивают возможности его внедрения в производство.

Одной из основных научно-практических задач в рамках данной проблемы – это разработка эффективного и экономичного высоковольтного электрооборудования для реализации магнитно-импульсного воздействия на расплав. Это обусловлено тем, что разработка технологий МИО расплавов невозможна без привязки к оборудованию, реализующему импульсные магнитные поля в объекте обработки. Но, как подтверждают данные публикаций, за основу такого оборудования берутся уже имеющиеся установки для МИО сплавов в твёрдом состоянии. Безусловно, это позволяет найти такие энергетические режимы обработки, которые дают положительный эффект. Но эти режимы ограничиваются запасаемой энергией в импульсе, амплитудой импульса тока, количеством импульсов. Однако, как показано в работах [8-11] такой подход, который не учитывает временные параметры разрядных

импульсов (длительность, период, крутизну нарастания тока и др.), не позволяет полностью раскрыть потенциал системы «источник тока-индуктор-расплав» и разработать научно-обоснованный подход к выбору наиболее рациональных параметров обработки и проектированию такого оборудования, которое бы отвечало современным требованиям и тенденциям развития как литейных технологий, так и силовой импульсной техники [11-14].

*Цель работы:* показать влияние частотных параметров импульса разрядного тока на эффективность МИО расплавов.

### *Постановка задачи*

МИО расплава может быть осуществлена тремя способами (рис. 1):

- радиальным расположением индуктора (рис. 1, а);
- погружаемым индуктором (рис. 1, б);
- осевым индуктором, расположенным или над поверхностью расплава или у дна ёмкости с расплавом (рис. 1, в).

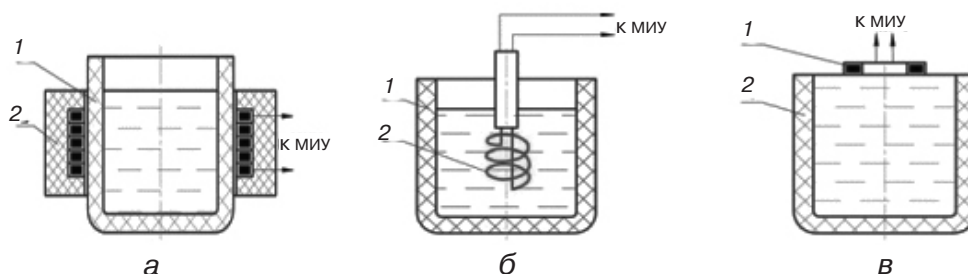


Рис. 1. Основные технологические схемы МИО расплава: 1 – тигель; 2 – индуктор; МИУ – магнитно-импульсная установка

В первом способе (рис. 1, а) между индуктором и расплавом за счёт стенки ёмкости возникает относительно большой зазор ( $\delta$ ). Но, как известно, величина индукции поля  $B \sim \delta^{-2}$ , таким образом обеспечение достаточной интенсивности воздействия сопряжено с высокими энергозатратами, соответственно – его сложностью и дороговизной. Кроме того, в этом способе ограничивается многофункциональное технологическое использование метода за счёт стационарного расположения индуктора. При втором способе (рис. 1, б) возникает проблема стойкости изоляции индуктора, а область использования для обработки расплава ограничивается лишь узким временным и температурным интервалом выше точки ликвидус. Третий же способ, при условии расположения индуктора над поверхностью расплава (рис. 1, в), не характеризуется ограничениями первых двух, поэтому он позволяет более полно реализовывать функциональные возможности оборудования для МИО расплавов и является более технологичным. Поэтому в данной работе анализировали именно его. Для теоретического анализа выбран расплав технически чистого алюминия, сплавы на основе которого изучались практически во всех публикациях по МИО.

Рассмотрим идеализированный случай расплава в цилиндрической ёмкости внутренним радиусом  $r_M$ , высота которой  $h = 3 \cdot r_M$ . Примем радиус жидкометаллического проводника  $r_M = 30$  мм; проводимость  $r_M = 3,8 \cdot 10^6$  См/м [15]; трёхвитковый спиральный медный индуктор размещён над поверхностью расплава с зазором  $\delta$ ; витки индуктора круглого поперечного сечения диаметром 5 мм.

Применение методов прямого измерения для изучения конфигурации и параметров электромагнитного поля, которое носит импульсный характер, зачастую сопровождается рядом технических сложностей, связанных со специфическими особенностями такой задачи, как, например: помехи в измерительной аппаратуре, высокая температура в зоне измерений. Следовательно, рациональным представляется исследование характеристик электромагнитного поля при МИО расплава с использованием методов математического моделирования. Успешное применение таких методов для решения

подобных задач показано, например, в работах [3, 15, 16]. Величины, которые, по данным основного числа публикаций, оказывают преобладающее влияние на конечный результат обработки: это электромагнитное давление  $P(t)$ , сила  $F(t)$ , скорость движения расплава  $v(t)$ . В то же время эти величины напрямую зависят от параметров импульса тока в индукторе  $I(t)$ , который инициирует все процессы при обработке импульсным магнитным полем и реализуется с помощью генератора импульсных токов. По форме этот импульс является затухающей синусоидой, вид которой зависит от напряжения на конденсаторной батарее ( $U_0$ ), ёмкости накопительных конденсаторов ( $C$ ), активного сопротивления разрядного контура и индуктора ( $R_k$ ), эквивалентной индуктивности ( $L$ ), равной сумме индуктивности разрядного контура ( $L_k$ ) и индуктивности системы «индуктор-расплав» ( $L_{ип}$ ) так, что:

$$I(t) = \frac{U_0}{\sqrt{L/C - R_k^2/4}} \cdot e^{(-R_k/2L)t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота импульса тока, рад·с<sup>-1</sup>, определяется из выражения:

$$\omega = \sqrt{(LC)^{-1} - (R_k/2L)^2}. \quad (2)$$

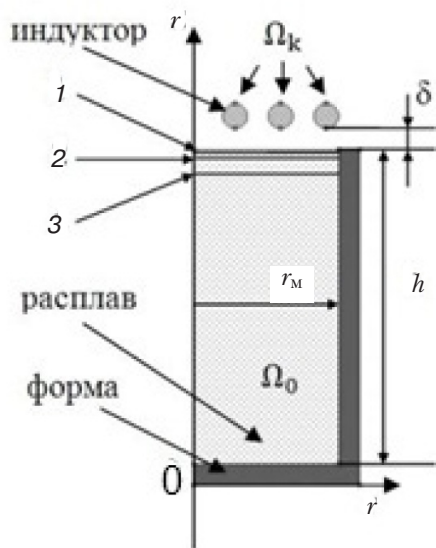


Рис. 2. Геометрическая модель расплава под индуктором: 1, 2, 3 – номера анализируемых сечений

На рис. 2 представлен 2D меридиональный разрез анализируемой системы  $\Omega$  в цилиндрических координатах  $(r, \theta, z)$ . Здесь  $\Omega_k$  – проводящая область каждого витка индуктора,  $\Omega_0$  – проводящая область расплава.

Для описания электродинамических процессов, протекающих при МИО расплава, воспользуемся уравнениями Максвелла для квазистационарного электромагнитного поля [17].

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \text{rot } \vec{E} = 0; \quad (4)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (5)$$

$$\text{div } \vec{D} = 0 \quad (6)$$

где  $\vec{H}$  – напряжённость магнитного поля, А/м;  $\vec{J}$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{E}$  – напряжённость электрического поля, В/м;  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля, Тл;  $\vec{D}$  – электрическая индукция, Кл/м<sup>2</sup>.

Каждый элемент области  $\Omega$  характеризуется своей плотностью тока, определяемой из выражения

$$\vec{J} = \begin{cases} \sigma \vec{E} + \sigma \vec{v} \cdot \vec{B}; & \text{в } \Omega / \Omega_{\kappa}, \\ \vec{J}_{\kappa}; & \text{в } \Omega_{\kappa}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\vec{v}$  – скорость расплава, м/с;  $\vec{J}_{\kappa}$  – плотность тока возбуждения, протекающего по индуктору с количеством витков  $S$ , А/м<sup>2</sup> [17, 18].

Примем, что в начальный момент времени скорость расплава равна 0. Задача решалась в безындукционном приближении и токами, которые возникают за счёт движения расплава в магнитном поле можно пренебречь. Поэтому исключим скорость из уравнений в рассматриваемой модели. В силу уравнения (3) в дальнейших расчётах можно использовать векторный магнитный потенциал  $\vec{A}$  ( $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$ ), который в осесимметричной системе так же, как магнитное поле и плотность тока, будет иметь одну только тангенциальную компоненту  $A_{\theta}$  так, что

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\theta}}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_{\theta}}{\partial z} \right) = J_{\theta}, \quad (8)$$

где

$$J_{\theta} = \begin{cases} \sigma \left( \frac{\partial A_{\theta}}{\partial t} \right); & \text{в } \Omega / \Omega_{\kappa}, \\ J_{\kappa\theta}; & \text{в } \Omega_{\kappa}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Объёмная электромагнитная сила, действующая на расплав  $\vec{E}_{\text{эм}}$ , и плотность наведенного тока  $\vec{J}_{\text{ind}}$  определяются выражениями [19]:

$$\vec{F}_{\text{эм}} = \vec{J}_{\text{ind}} \cdot \vec{B}; \quad (10)$$

$$\vec{J}_{\text{ind}} = -\sigma \left( \frac{\partial A_{\theta}}{\partial t} \right). \quad (11)$$

#### Результаты расчёта и их анализ

Решение уравнений (1-11) методом конечных разностей проводилось с помощью программного пакета Comsol Multiphysics. Исходные данные для расчёта параметров и характера как распределения индуцируемого магнитного поля в расплаве, так и параметров процессов, генерируемых этим полем выбирались на основе имеющихся публикаций и из логических соображений, ограниченных, с одной стороны, возможностями высоковольтной импульсной техники, а с другой, потребляемой установкой мощностью. Этими данными являлись параметры разрядного контура: зарядное напряжение батареи конденсаторов ( $U$ ), ёмкость батареи конденсаторов ( $C$ ), индуктивность разрядного контура ( $L$ ) и активное сопротивление разрядного контура ( $R_{\kappa}$ ). В ходе расчёта частота импульса тока  $f = \omega/2\pi$  варьировалась в пределах от 5 до 75 кГц.

Форму импульса тока  $I(t)$  зададим в виде затухающей синусоиды, которая адекватно аппроксимирует реальную кривую тока:

$$I(t) = \frac{U}{\sqrt{L/C}} \cdot e^{(-R/2L)t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (12)$$

где  $U$  – напряжение заряда конденсаторной батареи, В;  $C$  – ёмкость конденсаторной батареи, мкФ;  $L$  – индуктивность разрядного контура, мкГн;  $R$  – активное сопротивление разрядного контура, Ом.

Сечения, в которых рассчитывали значение индукции, выбраны из соображения, что в случае МИО в расплаве происходит скинирование индуцированного тока на величину равную  $\delta_c = 2 \cdot (2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot \omega)^{-1/2}$  [20]. Для минимального выбранного нами значения  $f = 5$  кГц;  $\delta_c \approx 3,5$  мм, для  $f = 75$  кГц;  $\delta_c \approx 1$  мм. Значение величины  $h$  выбиралось из условия её сопоставления с толщиной плоской заготовки как для МИО твёрдого сплава.

По описанной процедуре были выполнены расчёты, которые показали следующее. На рис. 3 представлено распределение индукции магнитного поля по сечениям 1; 2; 3 в расплаве в зависимости от частоты тока  $f$  при зазоре между индуктором и расплавом 1 мм.

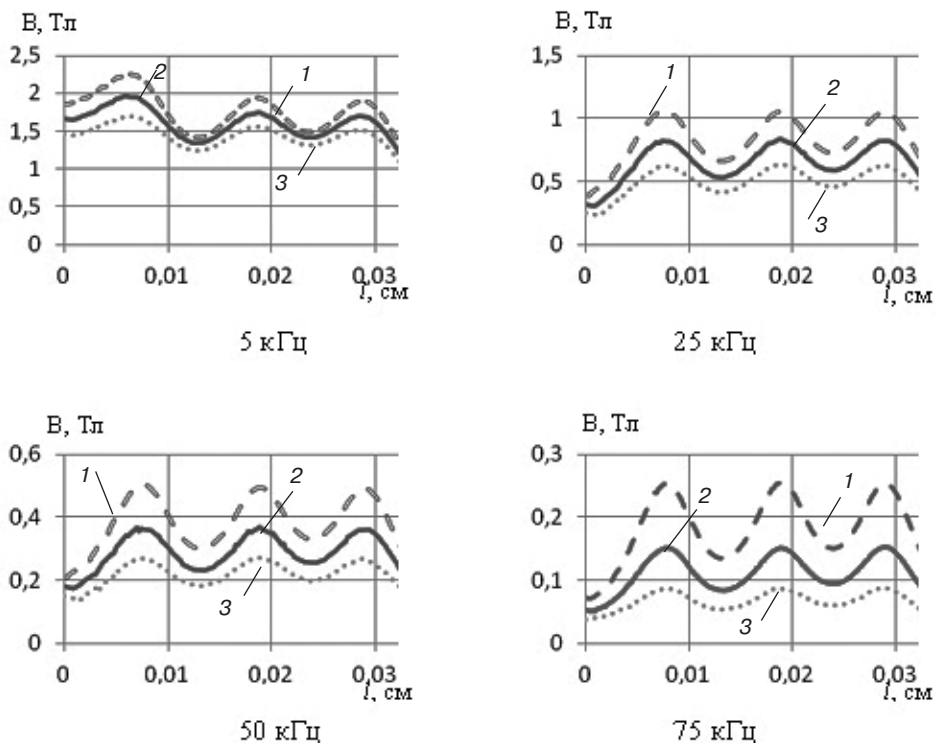


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля по сечениям в расплаве при  $h = 5$  мм

Интегральное значение электромагнитной силы  $F$ , с которой ИМП воздействует на расплав, полученное в результате интегрирования объёмной электромагнитной силы  $F_{эм}$  (формула 10) по объёму расплава, показано на рис. 4. Как видим, с ростом частоты тока проявляется насыщение зависимости  $F(f)$ . В этом случае более продуктивно силовое нагружение, которое получено в диапазоне значений  $f$  от 50 до 75 кГц, что соответствует периоду тока до 13 мкс. В свою очередь при  $L \approx 1$  мкГн, такие значения периода отвечают значению ёмкости накопителя ГИТ  $C \approx 4,3$  мкФ. Для 25 кА в этом случае значение  $U$  составит величину 12,5 кВ, а энергия, запасаемая в конденсаторах, равна 310 Дж, что позволяет существенно удешевить и упро-

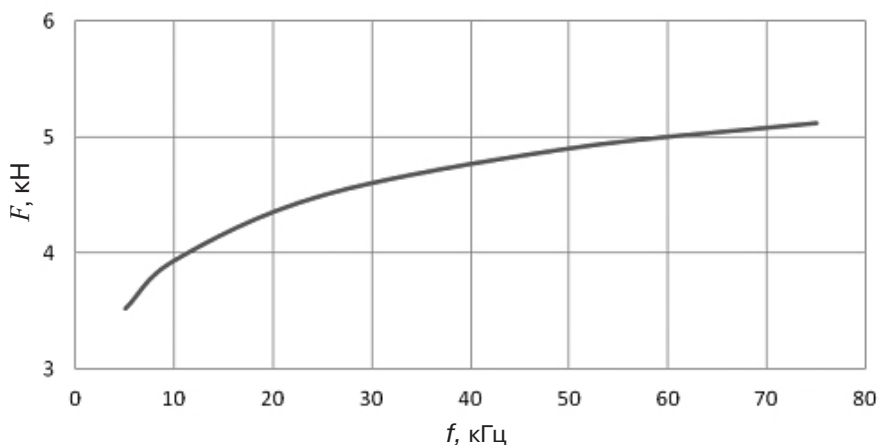


Рис. 4. Зависимость электромагнитной силы, действующей на расплав, от частоты импульса тока

стить конструкцию высоковольтного оборудования для МИО расплавов, в отличие от использования установок килоджоульного диапазона энергий, например, как в работах [2-4, 6].

Полученные результаты однозначно показывают, что величина  $f$  активно влияет на значение магнитной индукции и силы  $F$  в расплаве. Таким образом, учёт пространственно-временных параметров электромагнитного поля в течение одного импульса тока позволяет существенно расширить функциональные возможности МИО с точки зрения силового нагружения расплава. Также можно сказать, что использование временных параметров импульса тока и электромагнитного поля позволяет создавать новые подходы к решению такой многопараметрической задачи, как выбор параметров разрядного контура  $U, C, L, R_k$  и проектирование оборудования для технологии МИО расплавов в соответствии с современными требованиями литейного производства.

#### *Результаты экспериментальных исследований*

Поскольку теоретическое определение зависимости степени изменения внутренней структуры литого сплава от частоты следования разрядных импульсов  $f_{сл}$  в разработанной нами Femlab-модели не представляется возможным, была проведена серия экспериментальных исследований.

Влияние МИО расплавов на литое состояние производили путём обработки расплава в тигле плавильной печи и дальнейшей его заливке в формы для металлографических исследований. В качестве объекта обработки применялся сплав А319.0. Обработка расплава проводилась при температуре  $750 \pm 10$  °С, заливка происходила при температуре 710 °С по аналогии с работой [3]. Энергетические режимы и результаты обработки приведены в таблице, где  $W_0 = CU^2/2$  – запасаемая в конденсаторах энергия,  $P_{потр.}$  – средняя потребляемая установкой мощность,  $f_{сл}$  – частота следования разрядных импульсов.

В данной работе использован сплав А319.0, являющийся аналогом АК6М2, который использовали в работе [3], по классификации ASTM, что позволяет сравнивать результаты обработки.

На рис. 5 представлены характерные снимки микроструктуры сплава А319.0, подвергнутого МИО. Номера образцов соответствуют номерам режимов в таблице.

Как видно из полученных данных логично обоснованные временные параметры импульса позволяют достигать существенного воздействия на структуру обрабаты-

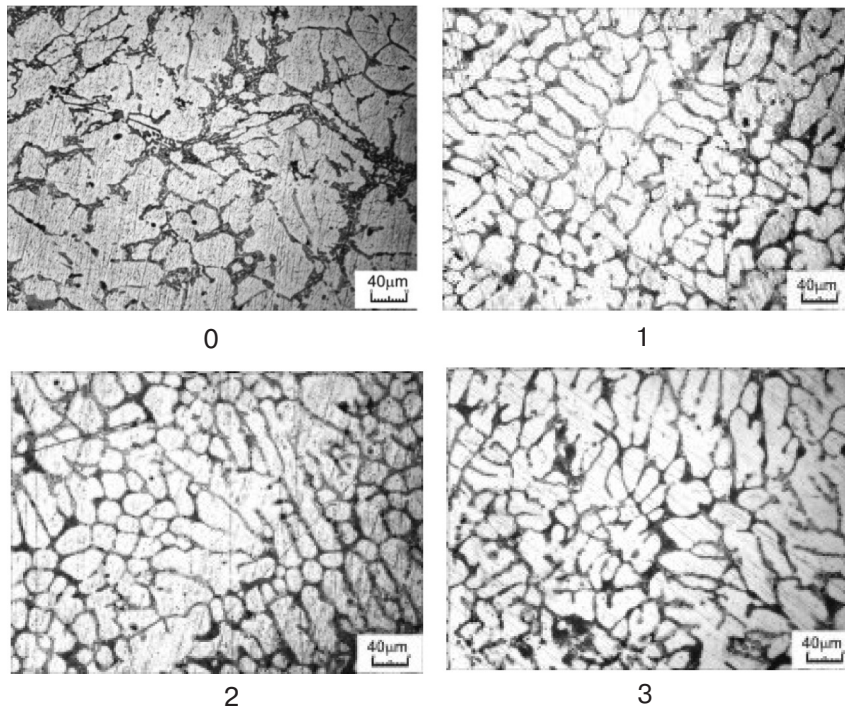


Рис. 5. Влияние магнитно-импульсной обработки расплава на структуру сплава А 319.0 (увеличение 250),  $\times 250$

**Сравнение режимов МИО расплава силумина и результаты их воздействия на литой металл**

Номер образца	$W_0$ , Дж	$f$ , кГц	$f_{сл}$ , имп/с	$P_{потр.}$ , кВт	Размер ячейки, $\alpha$ , мкм	Размер кремния в эвтектике, Si, мкм
0	–	–	–	–	57	9,6
1	112,5	100	2	0,225	34	2,5
2	112,5	100	6	0,675	27	2,5
3	200	100	4	0,8	24	2,9
4*	1500	25	1	1,5	27	–
5*	1500	25	1	1,5	31	–
6*	1500	25	1	1,5	29	–

\* – данные по обработке сплава АК6М2 из работы [3]

ваемых алюминиевых сплавов, более, чем в 2 раза уменьшить размер структурных составляющих (зерна и кремния в эвтектике) в объёме отливки. А также значительно снизить потребляемую мощность и запасаемую энергию, расширить возможности по их варьированию и, как следствие, наиболее рационально подобрать эффективные энергетические параметры обработки.

**Выводы**

- Методами математического моделирования определены зависимости пространственных и амплитудных характеристик магнитного поля и объёмной электромагнитной силы, воздействующей на расплав от собственной частоты импульса разрядного тока.

- Теоретически и практически установлено, что частотные параметры импульса разрядного тока позволяют существенно расширить функциональные возможности и повысить эффективность МИО расплавов.

• Экспериментально подтверждено влияние частотных параметров импульса разрядного тока на эффективность МИО расплавов. Достигнуто измельчение более, чем в 2 раза структурных составляющих (зерна и кремния в эвтектике) в объёме отливки. Определено, что короткие импульсы разрядного тока (период 10 мкс, длительность порядка 100 мкс) позволяют получать практически одинаковую степень измельчения микроструктуры отливки, как и при длинных импульсах (период более 100 мкс, длительность более 500 мкс). При этом запасаемая в конденсаторной батарее энергия и потребляемая установкой мощность меньше от 2 до 7 раз.



### Список литературы

1. Синчук А. В. Силовое магнито-импульсное воздействие на твердожидкий алюминиевый сплав А357 / А. В. Синчук, В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, А. С. Рубан // Процессы литья – 2012. – № 5. – С. 43-53
2. Магнитоимпульсная обработка кристаллизующихся расплавов / Е. Г. Чугунный // Литейное производство. – 1996. – № 1. – С.12-14.
3. Черников Д. Г. Совершенствование способа магнитно-импульсной обработки алюминиевых расплавов / Д. Г. Черников, В. А. Глущенков, В. И. Никитин, К. В. Никитин // Известия 4. Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – №.16 (6). – С. 256-262.
4. Черников Д. Г. Исследование влияния обработки расплавов импульсным магнитным полем высокой напряжённости на структуру и свойства алюминиево-кремниевых сплавов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 20.09.11 / Дмитрий Геннадьевич Черников. – Самара, 2011. – 26 с.
5. Bhole. Numerical Analysis and Investigation of Aluminum Electromagnetic Metal Forming Process /Kiran. S. Bhole, B. S. Kale, P. D. Deshmukh, O. G. Sonare // International Journal of Technology And Engineering System(IJTES). – 2011. – Vol. 2(1). – P. 98-102
6. Pei Ning Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al / Pei Ning, Gong Yongyong, Li Renxing, Xia Zanqi, Zhai Qijie // China foundry. – 2011. – Vol. 8(1). –P. 41-50.
7. Глущенков В. А. Влияние импульсного магнитного поля высокой напряженности на свойства жидких алюминиевых сплавов /В. А. Глущенков, Ф. В. Гречников, В. И. Никитин, Д. Г. Черников, А. Ю. Иголкин, К. В. Никитин, А. А. Поздняков // Литейщик России. – 2010. – № 7. – С. 34-39.
8. Цуркин В. Н. Принципы системного подхода к выбору методов внепечной обработки расплава /В. Н. Цуркин // Металл и литьё Украины. – 2009. – №. 6. – С.12-16.
9. Череповский С. С. Управляющие параметры магнито-импульсной обработки расплава / С. С. Череповский //Металл и литьё Украины. – 2014. – №.12. – С. 32-33.
10. Щерба А. А. Электротехнические компактные системы обработки расплавов металлов высоковольтными электроразрядными импульсами / А. А. Щерба, А. В. Иванов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2014. – Вип. 36. – С. 96-102.
11. Щерба А. А. Высоковольтный электротехнический комплекс для электроразрядной обработки расплавов металлов с повышенной интенсивностью электросилового воздействия и перемешивания / А. А. Щерба, А. В. Иванов // Электронная обработка материалов. – 2014. – № 2. – С. 108-116.
12. Вовченко А. И. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины (обзор) / А. И. Вовченко, Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 5. – С.69-74.
13. Карандашев Н. А. Технологические направления магнитно-импульсной обработки материалов / Н. А. Карандашев, А. Д. Глинберг // Тяжёлое машиностроение. – 2004. – № 5. – С. 8-13.
14. Семенова Т. В. Прогнозирование развития основных технологических процессов в литейном производстве Украины /Т. В. Семенова //Теория и практика металлургии. – 2004. – № 2. – С.22-25.
15. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – Справ. изд. – М.: Металлургия, 1989. – 264 с.
16. Pasca S. FEM Analysis of Transient Electromagnetic in Magnetofforming Processes / S. Pasca, V. Fireteanu 12 International Conference on Nonconventional Technologies: ICNcT, 2005. – № 2. – P. 67-74.
17. Подольцев А. Д. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в проводящих средах /А. Д. Подольцев, И. Д. Кучерявая. – Киев.: Изд. Института электродинамики НАН Украины. – 1999. – 363 с.



18. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель – М.: Мир. – 1972. – 382 с.
19. Белый, И. В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. – Харьков: Вища школа. – 1970. – 190 с.
20. Михайлов, В. М. Импульсные электромагнитные поля / В. М. Михайлов. – Харьков: Высшая школа, 1979. – 140 с.



## References

1. Sinchuk A. V., Curkin V. N., Ivanov A. V., Ruban A. S. Silovoe magnito-impul'snoe vozdejstvie na tverdozhidkij aljuminievij splav A357. Processy lit'ja. 2012, № 5, pp. 43-53 [in Russian].
2. Chugunnyj E. G. Magnitoimpul'snaja obrabotka kristallizujushhihsja rasplavov. Litejnoe proizvodstvo. 1996, № 1, pp. 12-14 [in Russian].
3. Chernikov D. G., Glushhenkov V. A., Nikitin V. I., Nikitin K. V. Covershenstvovanie sposoba magnitno-impul'snoj obrabotki aljuminievych rasplavov. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2014, № 16 (6), pp. 256-262 [in Russian].
4. Chernikov D. G. Issledovanie vlijanija obrabotki rasplavov impul'snym magnitnym polem vysokoj naprjazhennosti na strukturu i svojstva aljuminievo-kremnievych splavov [Tekst]: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk (20.09.11). Chernikov Dmitrij Gennad'evich; FGBOU VPO Samarskij gosudarstvennyj ajerokosmicheskij universitet imeni akademika S. P. Koroleva (nacional'nyj issledovatel'skij universitet). Samara, 2011, 26 p [in Russian].
5. Kiran S. Bhole, Kale B. S., Deshmukh P. D., Sonare O. G. Numerical Analysis and Investigation of Aluminum Electromagnetic Metal Forming Process. International Journal of Technology and Engineering System (IJTES). 2011. Vol. 2 (1), pp. 98-102 [in English].
6. Pei Ning, Gong Yongyong, Li Renxing, Xia Zanqi, Zhai Qijie Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al. China foundry. 2011. Vol. 8 (1), pp. 41-50 [in English].
7. Glushhenkov V. A., Grechnikov F. V., Nikitin V. I., Chernikov D. G. Igoalkin A. Ju, Nikitin K. V., Pozdnjakov A. A. Vlijanie impul'snogo magnitnogo polja vysokoj naprjazhennosti na svojstva zhidkikh aljuminievych splavov. Litejshhik Rossii. 2010, № 7. pp. 34-39 [in Russian].
8. Curkin V. N. Principy sistemnogo podhoda k vyboru metodov vnepechnoj obrabotki rasplava. Metall i lit'e Ukrainy. 2009, № 6, pp. 12-16 [in Russian].
9. Cherepovskij S. S. Upravljajushhie parametry magnito-impul'snoj obrabotki rasplava. Metall i lit'e Ukrainy. 2014, № 12, pp. 32-33 [in Russian].
10. Shherba A. A., Ivanov A. V. Jelektrotehnicheskie kompaktnye sistemy obrabotki rasplavov metallov vysokovol'tnymi jelektrozrjadnymi impul'sami. Pr. In-tu elektrodinamiki NAN Ukraini. 2014, 36, pp. 96-102 [in Russian].
11. Shherba A. A., Ivanov A. V. Vysokovol'tnyj jelektrotehnicheskij kompleks dlja jelektrozrjadnoj obrabotki rasplavov metallov s povyshennoj intensivnost'ju jelektrosilovogo vozdejstvija i peremeshivaniya. Jelektrohnajaja obrabotka materialov. 2014, № 2, pp. 108-116 [in Russian].
12. Vovchenko A. I., Boguslavskij L. Z., Miroshnichenko L. N. Tendencii razvitija moshhnyh vysokovol'tnyh generatorov impul'snyh tokov v IIPT NAN Ukrainy (obzor). Tehn. elektrodinamika. 2010, № 5, pp. 69-74 [in Russian].
13. Karandashev N. A., Glinberg A. D. Tehnologicheskie napravlenija magnitno-impul'snoj obrabotki materialov. Tjazheloe mashinostroenie. 2004, № 5, pp. 8-13 [in Russian].
14. Semenova T. V. Prognozirovanie razvitija osnovnyh tehnologicheskikh processov v litejnom proizvodstve Ukrainy. Teorija i praktika metallurgii. 2004, № 2, pp. 22-25 [in Russian].
15. Zinov'ev V. E. Teplofizicheskie svojstva metallov pri vysokih temperaturah. Sprav. izd. Moscow: Metallurgija, 1989, 264 p [in Russian].
16. Pasca S. FEM Analysis of Transient Electromagnetic in Magnetoforming Processes. Fireteanu 12 International Conference on Nonconventional Technologies: ICNcT, 2005, № 2, pp. 67-74 [in English].
17. Podol'cev A. D., Kucherjavaja I. D. Jelementy teorii i chislenного rascheta jelektromagnitnyh processov v provodjashhih sredah. Kiev: Izd. Instituta jelektrodinamiki NAN Ukrainy. 1999, 363 p [in Russian].
18. Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. Moscow: Mir. 1972, 382 p [in Russian].
19. Belyj. I. V., Fertik S. M., Himenko L. T. Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov. Har'kov: Vishha shkola. 1970, 190 p [in Russian].
20. Mihajlov V. M. Impul'snye jelektromagnitnye polja. Har'kov: Vysshaja shkola, 1979, 140 p [in Russian].

Поступила 02.12.2015