

Численное моделирование параметров нагружения расплава при осевой магнитно-импульсной обработке

В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, С. С. Череповский

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpta@ipt.com.ua*

Определена степень влияния пространственных характеристик магнитного поля на интенсивность силового воздействия на металлический расплав при его осевой магнитно-импульсной обработке.

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

УДК 621.745.56:621.3.014

ВВЕДЕНИЕ

Методы физико-технической обработки металлических расплавов в надликвидусной зоне при кристаллизации и последующем твердении с целью получения литых изделий с высокими показателями качества основаны на различных физических принципах. Они, как правило, являются многоцелевыми, но не универсальными. Это обстоятельство, а также постоянно растущие требования потребителя к качеству и расширение области научных знаний о физико-химических процессах в расплаве обуславливают необходимость поиска новых методов его обработки. В последнее время ряд публикаций свидетельствует о повышенном интересе исследователей к области литейного производства и технологическому методу магнитно-импульсной обработки (МИО) расплава [1–9]. Такой метод, но для твердого состояния объекта обработки, достаточно полно изучен и активно используется в промышленности [10, 11]. При этом формализованы процессы взаимодействия электромагнитного поля с обрабатываемым металлом, определены факторы, обеспечивающие задаваемые показатели формоизменения и (или) изменения его структуры, определены требования к генераторам импульсных токов (ГИТ) и разработаны их серии уже нескольких поколений, адаптированных к условиям промышленного использования в различных технологических операциях МИО. Но применительно к расплаву в этом плане делаются только первые шаги, принципиально показывающие широкие функциональные возможности МИО, прежде всего в плане измельчения (модифицирования) структуры литого состояния.

Магнитно-импульсную обработку расплава можно обеспечить тремя способами:

- радиальным расположением индуктора;
- погружным индуктором;

– осевым индуктором, расположенным или над поверхностью расплава, или у дна емкости с расплавом.

В первом способе между индуктором и расплавом за счет стенки емкости имеется относительно большой зазор (δ). А как известно, величина индукции поля $B \sim \delta^{-2}$, таким образом, обеспечение достаточной интенсивности воздействия сопряжено с высокими энергетическими характеристиками ГИТ. Кроме того, в этом способе ограничивается многофункциональное использование метода за счет стационарного расположения индуктора.

При втором способе возникает проблема стойкости изоляции на индукторе, а использовать его можно только для обработки расплава в надликвидусной зоне.

Третий же способ, при условии расположения индуктора над поверхностью расплава, не характеризуется ограничениями первых двух, поэтому он является менее энергоемким и более технологичным. Поэтому в данной работе анализировали именно его.

ОСОБЕННОСТИ МИО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА

Важнейшей отличительной особенностью МИО твердого состояния в случае расплава является структура этих состояний. В надликвидусной зоне – это микронеоднородная жидкость, в температурном интервале кристаллизации и твердения – это жидкость, содержащая долю твердой фазы, изменяющуюся от нуля до единицы. Кроме того, в отличие от плоской заготовки для МИО твердого тела, расплав обладает объемной формой, которая может иметь совершенно различную конфигурацию в зависимости от условий процессов литья. При МИО расплава также не проявляются эффекты намагничивания, перемагничивания, магнитострикции.

Учитывая сканирование индуцированного в расплаве тока, когда объем воздействия составляет лишь малую долю от всего объема обрабатываемого металла, иначе, чем в твердом теле, будут проявляться эффекты джоулева нагрева, но сформируются металлопотоки и волновые эффекты в жидкой металлической системе под действием импульсного магнитного давления.

Таким образом, МИО расплава от МИО твердого состояния отличаются иные физические принципы генерирования внешних структурно-формирующих параметров (ВСФП) воздействия, которые зависят от параметров ГИТ, индуктора и объекта обработки. В отличие от МИО твердого состояния в объекте обработки при МИО расплава будут развиваться и иные физические процессы, обеспечивающие внутренние структурно-кинетические и фазовые изменения (ВСКФИ). Именно они будут показывать многоцелевые возможности метода МИО расплава. В этом случае мы имеем многопараметрическую задачу, для решения которой целесообразно использовать более конструктивный, системный подход к анализу взаимообусловленной совокупности ВСФП воздействия и ВСКФИ в объекте обработки [12].

Проблемно-ориентированный поиск опубликованной информации в решении таких задач показал, что они были направлены в основном на изучение влияния МИО постфактум на структуру и свойства литого металла или на его литейные свойства, минуя изучение процессов, происходящих в объекте обработки. При этом сам ГИТ практически калькировался по оборудованию для обработки твердого состояния, для которого характерны высокие параметры энергопотребления и относительно высокая стоимость [10], что негативно скажется на оптимизации параметра «цена-качество» для литой металлопродукции. В качестве же параметров воздействия выбирались энергия заряда батареи конденсаторов ГИТ, число импульсов и частота импульса разрядного тока. По нашему мнению, такой выбор параметров не может корректно отображать как процессы нагружения расплава, так и задавать исходные данные для решения задачи о ВСКФИ в объекте обработки. Для системы «ГИТ-Индуктор-Расплав» в качестве параметров ГИТ логично выбирать напряжение зарядки конденсаторов (U), их емкость (C), индуктивность (L) и активное сопротивление (R) разрядного контура с учетом индукторной системы. Решение задач о разряде батареи конденсаторов на индуктор отражено в работах [2, 6, 9], определяющих временную зависимость разрядного тока $I(t)$. Для цепочки «Индуктор-Расплав» связующим звеном является магнитное поле, которое возникает

вокруг индуктора при протекании по нему разрядного тока, определяемого набором U, C, L, R , и которое генерирует в расплаве процессы, обеспечивающие ВСКФИ.

Таким образом, актуально на первом этапе показать зависимость характеристик этого поля от параметров ГИТ, а также их влияние на интенсивность силового воздействия на расплав. Это даст возможность определить пути повышения эффективности МИО расплава при минимизации энергозатрат, а также получить научные данные для исследования процессов в системе «ГИТ-Индуктор-Расплав».

Цель работы – определение степени влияния пространственных характеристик магнитного поля на интенсивность силового воздействия на расплав при его осевой магнитно-импульсной обработке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках поставленной цели необходимо определить основную характеристику магнитного поля – его магнитную индукцию B .

Ограничимся далее только жидким состоянием и выберем для исследования расплав алюминия, который изучался практически во всех публикациях разных авторов.

Рассмотрим идеализированный случай расплава в цилиндрической емкости внутренним радиусом r_m , высота которой h имеет три значения: r_m ; $0,5 \cdot r_m$; 3 мм. Примем $r_m = 30$ мм; проводимость $\sigma = 3,8 \cdot 10^6$ См/м [13]; трехвитковый спиральный медный индуктор размещен над поверхностью расплава с зазором δ ; витки индуктора круглого поперечного сечения имели диаметр 5 мм.

Изучение конфигурации и параметров электромагнитного поля в расплаве методами прямого измерения не представляется возможным ввиду технических сложностей, связанных с неизбежно возникающими наводками и достаточно высокой температурой области, в которой производится обработка. По этим причинам для исследования характеристик поля предпочтительным представляется использование методов математического моделирования. Так, в работах [2, 14, 15] успешно применяются методы конечно-разностного моделирования для изучения влияния импульсного магнитного поля (ИМП) на расплав. Для магнитно-импульсной штамповки предложены простые инженерные формулы для оценки степени влияния ИМП на обрабатываемый материал [4], а в статье [16] проведена успешная проверка применения данных формул для МИО жидкого металла. Вместе с тем в существующих публикациях по МИО больше внимания уделяется конечным параметрам электроси-

лового воздействия, таким как сила, давление, скорость движения расплава.

Как отмечено в работах [7, 14], исследование пространственных характеристик поля при импульсных процессах достаточно сложная задача, требующая значительных затрат человеко-часов и машинного времени. Если же методами спектрального анализа выделить несущую частоту импульса, на которую приходится основная часть энергии, то расчет можно упростить до моделирования протекания через индуктор синусоидального тока, что с достаточной степенью точности, порядка 10% [17], позволяет получить картину поля, учитывающую его распределение в объеме жидкометаллического проводника в установившемся режиме. Поэтому ограничимся рассмотрением синусоидального тока в индукторе.

На рис. 1 представлен 2D меридиональный разрез анализируемой системы Ω в цилиндрических координатах (r, θ, z) . Здесь Ω_k – проводящая область каждого витка индуктора; Ω_0 – проводящая область расплава.

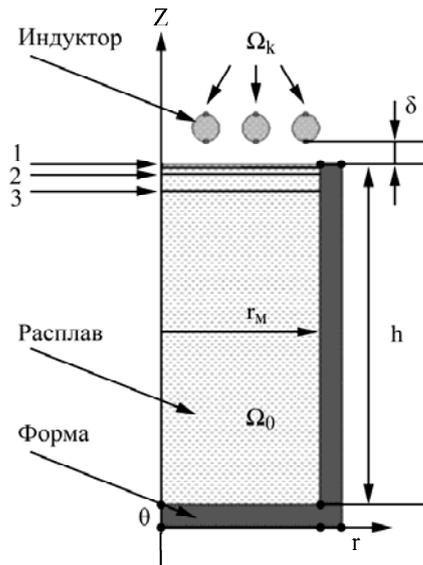


Рис. 1. Геометрическая модель расплава под индуктором: 1, 2, 3 – номера анализируемых сечений.

Для описания электродинамических процессов, протекающих при МИО расплава, воспользуемся уравнениями Максвелла для квазистационарного электромагнитного поля:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \text{rot} \vec{E} = 0; \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0; \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{D} = 0, \quad (4)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля, А/м; \vec{J} – плотность тока, А/м²; \vec{E} – напряженность

электрического поля, В/м; \vec{B} – индукция магнитного поля, Тл; \vec{D} – электрическая индукция, Кл/м².

Каждый элемент области Ω характеризуется своей плотностью тока, определяемой из выражения:

$$\vec{J} = \begin{cases} \sigma \vec{E} + \sigma \vec{V} \times \vec{B}; & \text{в } \Omega \setminus \Omega_k, \\ \vec{J}_k; & \text{в } \Omega_k, \end{cases} \quad (5)$$

где σ – проводимость материала индуктора, См/м; \vec{J}_k – плотность тока возбуждения, протекающего по индуктору с количеством витков S , А/м².

Отметим, что в начальный момент времени скорость расплава равна нулю. Задача решалась в безиндукционном приближении, следовательно, токами, возникающими за счет движения расплава в магнитном поле, можно пренебречь. Поэтому исключим скорость из уравнений в рассматриваемой модели. В силу уравнения (3) в дальнейших расчетах 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 только одну тангенциальную компоненту A_θ :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial r \cdot A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = J_\theta, \quad (6)$$

где

$$J_\theta = \begin{cases} \sigma \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial t} \right); & \text{в } \Omega \setminus \Omega_k, \\ J_{k\theta}; & \text{в } \Omega_k, \end{cases} \quad (7)$$

а μ – магнитная проницаемость.

Объемная электромагнитная сила, действующая на расплав $\vec{F}_{эм}$, и плотность наведенного тока \vec{J}_{ind} определяются выражениями:

$$\vec{F}_{эм} = \vec{J}_{ind} \cdot \vec{B}; \quad (8)$$

$$\vec{J}_{ind} = -\sigma \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial t} \right). \quad (9)$$

Задача решалась для гармонически изменяющегося магнитного поля, которое при постоянных значениях μ и σ изменяется по закону синусоиды так же, как и ток в индукторе, которым оно вызвано, плотность тока в индукторе определяется из выражения:

$$I = \int_S J_k dS,$$

где I – полный ток в индукторе, А; S – площадь сечения индуктора, м²; J_k – плотность тока в индукторе, А/м².

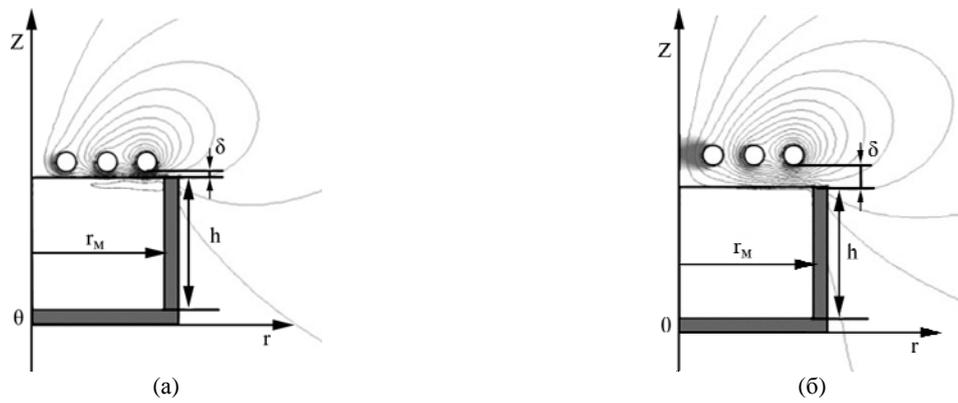


Рис. 2. Характерное распределение магнитного поля:
(а) – $\delta = 1$ мм; (б) – $\delta = 5$ мм.

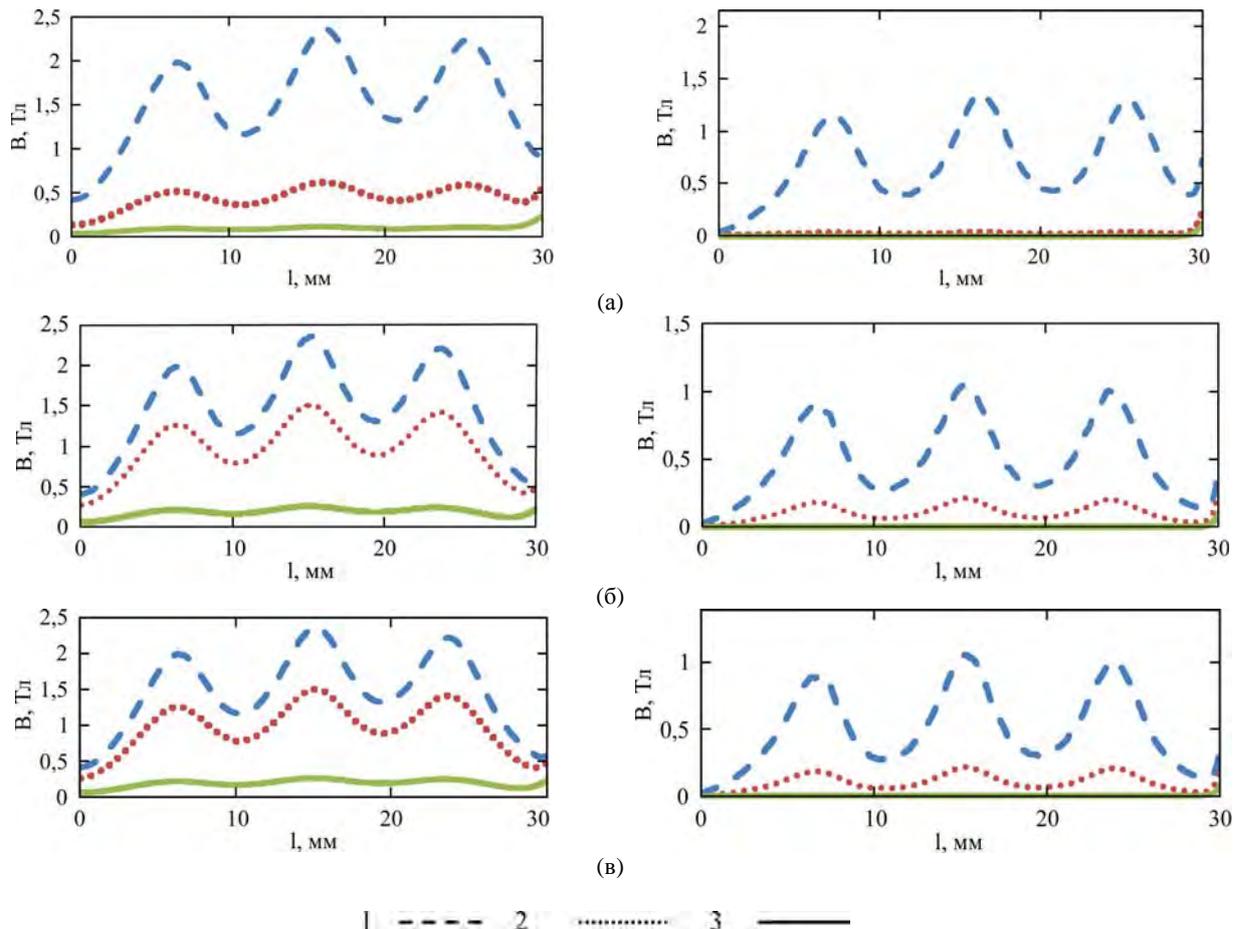


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля по сечениям в расплаве (см. рис. 1):
(а) – при $r = h$; (б) – при $h = 0,5r$; (в) – при $h = 5$ мм.

Граничным принято условие непрерывности поля на границе раздела фаз. Решение уравнений (1–9) методом конечных разностей проводилось с помощью программного пакета FEMM 4.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ АНАЛИЗ

Как уже упоминалось, в опубликованных статьях по магнитно-импульсной обработке расплава ее эффект анализировался в зависимости от запасенной энергии в генераторе импульсных токов (W) и частоты импульса тока (f). Но для численного моделирования нужно задавать его

параметры, для выбранной синусоиды это максимальная амплитуда I_0 и частота $f = 1/T$, где T – период колебаний тока. Для разрядного контура с емкостным накопителем

$$I_0 = U / \sqrt{L/C},$$

где C – емкость конденсатора; U – напряжение на его обкладках; L – индуктивность контура [4, 18], а учитывая то, что

$$W = 0,5C \cdot U^2,$$

можно записать:

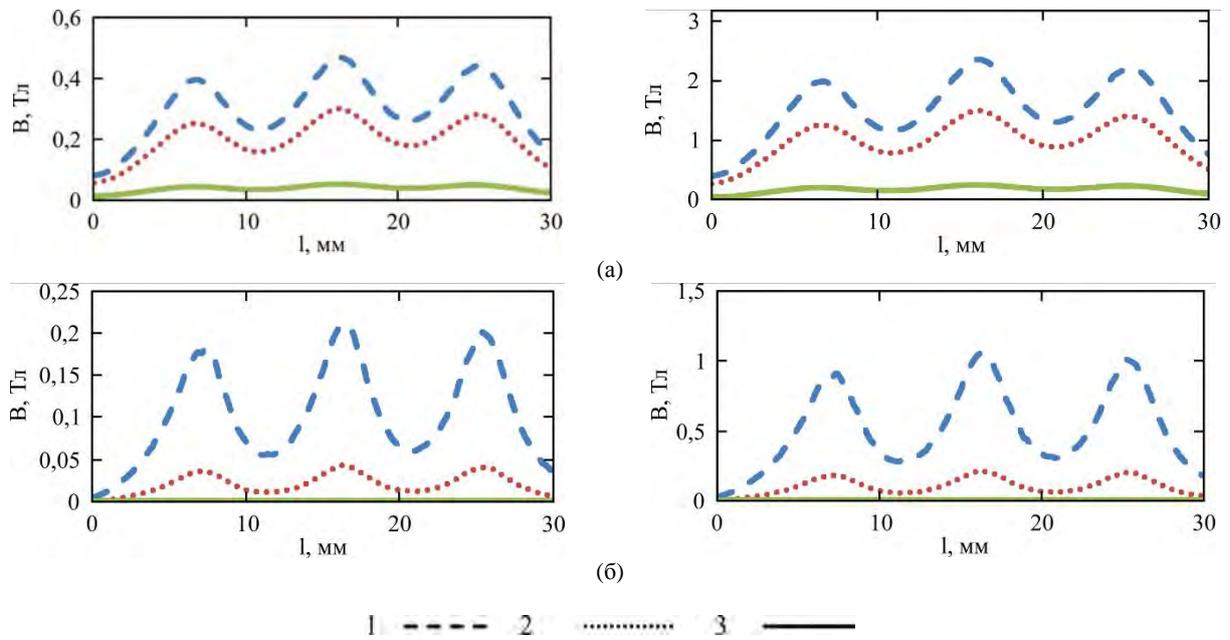


Рис. 4. Индукция магнитного поля по сечениям в расплаве (см. рис. 1) в зависимости от силы тока при $h = 0,5r$:
(а) – 5 кГц; (б) – 75 кГц.

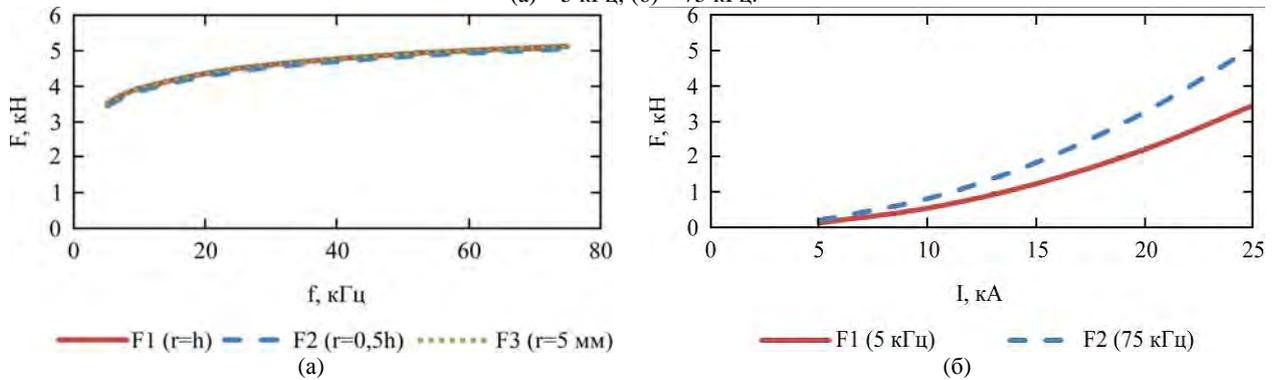


Рис. 5. Зависимость электромагнитной силы, действующей на расплав:
(а) – от частоты импульса тока; (б) – от амплитуды силы тока.

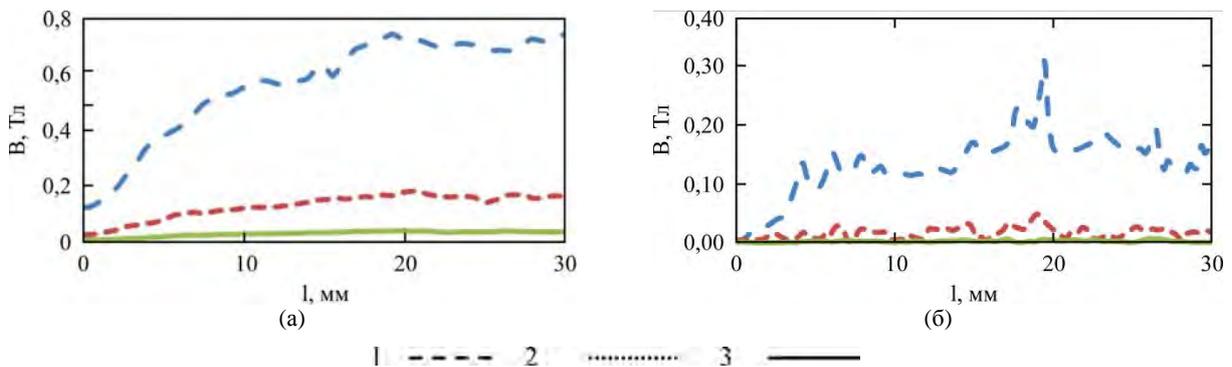


Рис. 6. Индукция магнитного поля по сечениям в расплаве (см. рис. 1) в зависимости от частоты при $\delta = 5$ мм:
(а) – 5 кГц; (б) – 75 кГц.

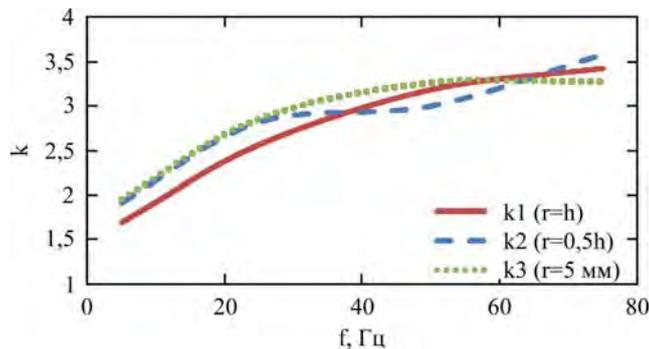


Рис. 7. Коэффициенты неоднородности зависимости $B(r)$.

$$I_0 = \sqrt{2W/L}.$$

Значение частоты импульса разрядного тока определяется по формуле:

$$f = 1/2\pi\sqrt{1/LC - R^2/4L^2},$$

где R – сопротивление контура. При малых значениях R можно использовать оценку

$$f = 0,5\pi\sqrt{1/LC},$$

но только для первого периода тока [4, 18]. Таким образом, для корректной постановки задачи при определении как характера и параметров распределения индуцируемого магнитного поля в расплаве, так и параметров процессов, генерируемых этим полем, нужно или задавать параметры разрядного контура U , C , L , R , или же использовать осциллограмму тока. В первом случае нужно решать многопараметрическую задачу, поэтому для ее решения нами были выбраны значения I_0 и f из логических соображений, априори будучи ограничены возможностями высоковольтной импульсной техники, с одной стороны, и потребляемой мощностью – с другой.

Выполним расчеты для значений f от 5 до 75 кГц, что соответствует периодам колебаний тока от 200 до 13 мкс, при I_0 от 5 до 25 кА при условии:

$$I = I_0 \sin 2\pi ft.$$

Значения магнитной индукции покажем в сечениях соответственно на расстоянии 0,5 мм от поверхности расплава, 1 и 5 мм – 1, 2, 3 соответственно (рис. 1). Сечения, в которых рассчитывали значение индукции, выбраны из соображений, что при МИО в расплаве возникает сканирование индуцированного тока на величину

$$\delta_c = 2(\mu\mu_0\sigma\omega)^{1/2}.$$

Для минимального выбранного нами значения $f = 5$ кГц величина $\delta_c \approx 3,5$ мм, для максимального $f = 75$ кГц имеем $\delta_c \approx 1$ мм. Минимальное значение высоты h выбиралось из условия ее сопоставления с толщиной плоской заготовки при МИО твердого металла, а максимальное – соответствовало возможному реальному объему расплава в технологиях литейного производства.

По описанной процедуре были выполнены расчеты, которые показали следующее. На рис. 2 представлено характерное распределение магнитного поля для случая зазора между индуктором и расплавом 5 и 1 мм. Рис. 3 иллюстрирует распределение индукции магнитного поля по сечениям 1; 2; 3 в расплаве в зависимости от частоты тока f при разных значениях h и зазоре между индуктором и расплавом 1 мм. На рис. 4

представлены распределения индукции для $h = 0,5r_m$ в указанных сечениях для разных значений I_0 . Интегральное значение электромагнитной силы F , с которой ИМП воздействует на расплав, полученное в результате интегрирования объемной электромагнитной силы $F_{эм}$ (8) по объему расплава, показано на рис. 5. Для сравнения с результатами, полученными при значении зазора между индуктором и расплавом $\delta = 1$ мм (рис. 3, 4), на рис. 6 показано распределение индукции при зазоре между индуктором и расплавом $\delta = 5$ мм при $I_0 = 25$ кА.

Полученные результаты показывают, что величины зазора δ и тока I_0 более активно влияют на значение F в расплаве, чем величина f , поэтому рост значения F наиболее рационально осуществлять, увеличивая напряжения U , хотя в этом плане возрастает величина потребляемой ГИТ мощности. При этом для значения $\delta = 1$ мм проявляется эффект существенно неоднородного распределения индукции в скин-слое по радиусу. На рис. 7 показано значение коэффициента неоднородности $k = B_{\max}/B_{\min}$. Такие пульсации индукции вдоль r должны соответствующим образом влиять на неоднородность приповерхностных процессов в расплаве, что, в свою очередь, может направить процессы перестройки структуры расплава в позитивную сторону. Рис. 5 позволяет прогнозировать функциональные возможности МИО с точки зрения силового нагружения расплава. Как видим, с ростом частоты тока проявляется насыщение зависимости $F(f)$. В этом случае более продуктивно силовое нагружение, полученное при значениях 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 емкости накопителя ГИТ $C \approx 4,5$ мкФ. Для 25 кА в этом случае значение U составит величину 12,5 кВ, а $W = 310$ Дж.

ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты численных расчетов по описанной методике с помощью программного пакета FEMM 4.2 показали, что значение интегрального объемного усилия, генерируемого магнитным полем при МИО, не зависит от объема расплава, а определяется значениями максимальной амплитуды разрядного тока и зазора δ и в большей мере частотой тока.

2. С уменьшением зазора между индуктором и поверхностью расплава до 1 мм распределение индукции в радиальном направлении в скин-слое имеет неоднородный квазисинусоидальный характер. При этом отношение $B_{\max}/B_{\min} \approx 3,5$ при $I_0 = 25$ кА и $f = 75$ кГц. Это, в свою очередь, может способствовать формированию в припо-

верхностном слое расплава существенно нелинейных процессов, роль которых в эффекте МИО требует детального изучения.

3. Параметры поля по отношению к расплаву являются внешними структурно-формирующими. При этом поле формируется за счет энергии разряда ГИТ и является генератором возмущений в расплаве, формирующих в нем внутренние структурно-кинетические и фазовые изменения. Этот вывод показывает рациональный принцип многопараметрической диагностики МИО, возможные методы прогнозирования ее эффекта и подход к выбору ГИТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чугунный Е.Г. *Литейное производство*. 1996, **1**, 12–14.
2. Глущенко В.А., Гречников Ф. В., Никитин В. И., Черников Д.Г. и др. *Литейщик России*. 2010, **7**, 34–39.
3. Черников Д. Г., Глущенко В.А., Никитин В.И., Никитин К.В. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014, **16**(6), 256–262.
4. Kiran S. Bhole, Kale B.S., Deshmukh P.D., Sonare O.G. *IJTES*. 2011, **2**(1), 98–102.
5. Fu J.W., Yang Y.S. *Mater Lett*. 2012, **67**, 252–255.
6. Li Bo, Yin Zhenxing, Yong Youngyoung, Li Kefeng, et al. *China foundry*. 1988, **8**(2), 172–176.
7. Pei Ning, Gong Yongyong, Li Renxing, Xia Zhanqi, et al. *China Foundry*. 2011, **8**(1), 47–50.
8. Черников Д.Г., Глущенко В.А., Никитин В.И., Никитин К.В. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014, **16**(6), 256–262.
9. Синчук А.В., Цуркин В.Н., Иванов В.А., Рубан А.С. *Процессы литья*. 2012, **5**, 43–53.
10. Батигін Ю.В., Лавінський В.І. *Імпульсні магнітні поля для прогресивних технологій*. Т. 1. Харків: НТУ «ХПІ», 2001. 273 с.
11. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. *Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов*. Харьков: Вища школа, 1997. 168 с.
12. Цуркин В.Н. *Металл и литье Украины*. 2009, **6**, 12–16.
13. Смитлз К.Дж. *Металлы*. М: Металлургия, 1980. 447 с.
14. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Д. *Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах*. Киев: Изд. Института электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.
15. Pasca S., Fireteanu V. *ICNcT*. 2005, **2**, 67–74.
16. Череповский С.С. *Металл и литье Украины*. 2014, **12**, 32–33.
17. Кнопфель Г. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: Мир, 1972. 382 с.
18. Щерба А.А., Дубовенко К.В. *Высоковольтные электроразрядные компактные системы*. Киев: Наукова думка, 2008. 296 с.

Поступила 17.04.15

После доработки 02.12.15

Summary

The degree of the impact of spatial parameters of a magnetic-field on the intensity of the force action on a molten metal under the axial magnetic-pulse treatment is determined.

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