

УДК 621.745.56:621.3.014

А. В. ИВАНОВ, С. С. ЧЕРЕПОВСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ «ИНДУКТОР-РАСПЛАВ» ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВОВ

Методами математического моделирования установлены условия и особенности трансформации энергии в системе «индуктор-расплав» в зависимости от геометрических параметров данной системы и частотных параметров импульсного магнитного поля. Получены зависимости эффективности преобразования энергии в системе «индуктор-расплав» от указанных параметров. Результаты могут быть использованы для проектирования комплексов магнитно-импульсной обработки расплава силуминов.

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

Введение. В технологиях литейного производства используются различные методы обработки металлического расплава в жидком состоянии, при кристаллизации и твердении. Их основная задача – повышение качества литого металла, должна обязательно рационально сопрягаться в системе цена-качество, как того требуют условия современного заготовительного производства. Сами же методы обработки, как традиционные, так и вновь разрабатываемые, являются многоцелевыми и многофакторными, но не универсальными. Поэтому актуальными являются задачи, направленные на повышении их эффективности при минимизации энергозатрат на обработку.

Одним из относительно новых методов, получившим свое развитие в конце XX века, является осевая магнитно-импульсная обработка расплавов (МИО), которая заключается в преобразовании электрической энергии, накопленной в батарее конденсаторов магнитно-импульсной установки (МИУ), с помощью индуктора в теплосиловое воздействие на обрабатываемый расплав через его поверхность. Положительное влияние МИО на расплавы показано рядом инициативных исследований как отечественных, так и зарубежных научных коллективов [1–5]. Однако подход к выбору рациональных параметров обработки и соответственного оборудования происходит методом перебора, на основании уже имеющихся источников импульсного тока, в основном путем калькирования установок для магнитно-импульсной штамповки. Однако, в связи с постоянно повышающимися требованиями к энергоэффективности, экономичности и эргономичности оборудования таким подходом не удастся уверенно занять свою нишу и закрепиться в современном литейном производстве. Параметры воздействия в МИУ определяются процессами преобразования энергии в системе «Источник тока – Индуктор–Расплав». В работах по магнитно-импульсной штамповке достаточно точно описаны особенности преобразования энергии в системе «Источник тока – Индуктор». Практически без существенных правок эти положения могут быть использованы для МИО расплава. Но именно особенности объекта обработки жидкого состояния (см. рис. 1) приводят к необходимости особо выделить для исследований звено полной системы «Индуктор–Расплав».



Рис. 1 – Принципиальные отличия МИО в методах ОМД с МИО в методах литья

Например, в магнитно-импульсной штамповке оптимизация параметров привязана к заданной толщине заготовки, в случае же с обработкой расплавов глубина проникновения поля и скинирования индуцированного тока являются взаимозависимыми от параметров системы «Индуктор-Расплав» фактором, определяющим эффективность обработки расплава. Соответственно – по другим критериям определяется эффективность преобразования электромагнитной энергии и интенсивность воздействия и под другим углом зрения, чем для технологии МИО твердых металлов, нужно обратить внимание на выбор рациональных параметров обработки и конструктивных решений для оборудования.

Цель работы. Целью данной работы является определение условий и особенностей преобразования энергии в системе «Индуктор-Расплав» при обработке расплава жидких силуминов.

Постановка задачи. Рассмотрим осесимметричную индукторную систему, приведенную на рис. 2. Система «Индуктор-Расплав» включает в себя индуктор с витками квадратного сечения, диэлектрический немагнитный промежуток и определенный объем поверхности обрабатываемого расплава.

Энергия магнитного поля, выделяемая в рабочем промежутке, т.е. между поверхностью расплава и индуктором, идет на работу по силовому воздействию на расплав, тепловую обработку поверхности расплава и тепловые потери в индукторе.

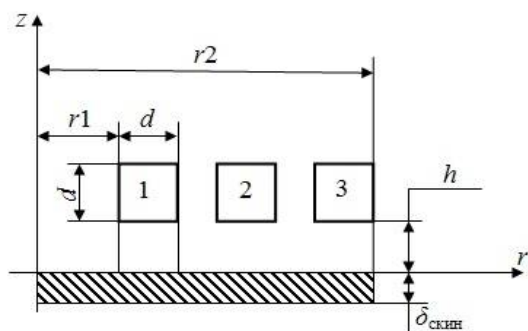


Рис. 2 – Схематическое изображение системы «Индуктор-Расплав»: 1, 2, 3 – витки индуктора; d – ширина и высота витка; r₁ – внутренний радиус индуктора; r₂ – внешний радиус индуктора; δ_{скин} – глубина проникновения индуктированного тока в расплав; h – расстояние между индуктором и расплавом

Энергия магнитного поля, выделяемая в рабочем промежутке, т.е. между поверхностью расплава и индуктором, идет на работу по силовому воздействию на расплав, тепловую обработку поверхности расплава и тепловые потери в индукторе. Точный расчет такой задачи, особенно с учетом скин-эффекта, представляет значительные трудности и, зачастую, опирается на оценки и эмпирический опыт даже для магнитно-импульсной штамповки [6, 7], т.е. технологической области, которая развивается довольно давно. Однако, как упоминалось ранее, процесс обработки расплава и твердого тела импульсными магнитными полями отличается своими целями и решаемыми задачами, поэтому напрямую перенести опыт, накопленный в области МИО твердого состояния, нельзя. Конечно же, как и при обработке твердого тела, физические процессы, а именно – преобразование электромагнитной энергии индуктора в энергию магнитного поля в объекте обработки, на первый взгляд, идентичны. Но именно отражение особенностей, относящихся к обработке силуминов, пока только на уровне оценок и описания сценариев процессов, представляет собой актуальную задачу.

Примем, что поле между витками индуктора и расплавом равномерно, тогда электромагнитная энергия в индукторе W_{em} и магнитная энергия в объеме между индуктором и расплавом W_m практически равны [7] и можно записать:

$$W_{em} \approx W_m, \quad (1)$$

Запишем это выражение через индуктивность системы «Индуктор-Расплав» L_и, Гн; напряженность магнитного поля в зазоре между индуктором и расплавом H_и(t), А/м; ток, протекающий в индукторе при разряде емкостного накопителя I(t), А:

$$L_{и} \cdot I^2(t) / 2 \approx \mu_r \mu_0 H_{и}^2(t) \cdot V / 2, \quad (2)$$

где μ₀ – магнитная постоянная, μ₀=4·π·10⁻⁷ Гн/м;
μ_r – относительная магнитная проницаемость;

V – объем воздушной полости между поверхностью индуктора и расплавом, м³.

Объем V, в соответствии с допущением о равномерности распределения поля, определяем как

$$V = 2\pi \cdot h \cdot (r_2^2 - r_1^2). \quad (3)$$

Напряженность поля в объеме между индуктором и расплавом, в соответствии с законом полного тока, определяется выражением

$$H_{и} = I(t) \cdot N_B^2 / (2 \cdot (r_2 - r_1)), \quad (4)$$

где N_B – количество витков индуктора.

Запишем выражения для L_и в виде:

$$L_{и} = \frac{\mu_r \mu_0 \cdot \pi \cdot h \cdot N_B^2}{2} \cdot \left(\frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} \right). \quad (5)$$

Используя выражения (2–5), можно через геометрические параметры индукторной системы и параметры разрядной цепи выразить и рассчитать такие электрические и энергетические параметры системы «Индуктор-Расплав» как, L_и, H_и(t), W_m.

Проанализируем степень изменения значения L_и, а также максимальные значения поля H_и и энергии W_m с учетом того, что максимальная амплитуда тока в индукторе, и, соответственно, в разрядной цепи генератора импульсных токов будет описываться выражением

$$I_{max} = U_0 \cdot \sqrt{C_0 / L_s}, \quad (6)$$

где U₀ – напряжение на зажимах конденсаторной батареи, В;

L_s – суммарная индуктивность разрядного контура и индукторной системы, Гн;

C₀ – емкость конденсаторных батарей, Ф.

Суммарная индуктивность в свою очередь равна

$$L_s = L_k + L_{и}, \quad (7)$$

где L_k – собственная индуктивность разрядной цепи, Гн.

Отношение энергии, запасенной в конденсаторах генератора импульсных токов (W₀), к магнитной энергии в зазоре между индуктором и расплавом (эффективность преобразования электрической энергии в магнитную) можно выразить соотношением:

$$W_m / W_0 = \frac{\mu_r \mu_0 \cdot \pi \cdot h \cdot N_B^2}{2 L_s} \cdot \left(\frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} \right). \quad (8)$$

Энергия магнитного поля в зазоре отвечает за формирование управляющих электродинамических воздействий и является функцией f(r₁, r₂, N_B, L_k, L_и, U₀, C₀, h, μ). Рассмотрим сначала влияние геометрических параметров системы «Индуктор-Расплав» h, r₁ и r₂ на величину W_m. Для упрощения задачи выберем параметры разрядной цепи и индуктора, близкие к тем, которые использованы в работе [8]. Примем U₀=20 кВ; C₀=1 мкФ; L_k=2 мкГн;

h изменяется от 1 до 10 мм; $N_{\text{вит}}=3$; r_1 изменяется от 5 до 30 мм, материал – технически чистый алюминий.

Влияние временных параметров импульса тока на процесс формирования электродинамического воздействия на расплав можно оценить через эффективность преобразования магнитной энергии в зазоре в тепловую энергию в расплаве, выделяемую в поверхностном слое расплава, ограниченном глубиной скин-слоя, в котором течет индуцированный ток.

Для нашей системы «Индуктор–Расплав» примем допущение, которое имеет место во многих практических случаях [7, 9–11] о том, что частота и форма индуцированного тока совпадают с аналогичными параметрами тока в индукторе.

В соответствии с законом полного тока, индуцированный в расплаве ток, в первом приближении, связан с напряженностью магнитного поля на поверхности расплава прямо пропорциональной зависимостью:

$$H_{\text{и}} = I_{\text{и}}(t)/(2 \cdot (r_2 - r_1)), \quad (9)$$

где $I_{\text{и}}(t)$ – индуцированный в расплаве ток, А.

Количество теплоты, которое выделяется при этом, можно оценить из выражения:

$$Q = \int_0^T I_{\text{и}}^2(t) R_s dt, \quad (10)$$

где $T_{\text{и}}$ – длительность импульса, с;

R_s – сопротивление области, ограниченной толщиной скин-слоя $\delta_{\text{скин}}$, Ом.

Сопротивление R_s можно приближенно определить, как:

$$R_s = \frac{r_2 - r_1}{\sigma_{\text{Al}}(r_2 - r_1)\delta_{\text{скин}}} \approx \frac{1}{\sigma_{\text{Al}} \cdot \delta_{\text{скин}}}, \quad (11)$$

где

$$\delta_{\text{скин}} = \frac{2}{\sqrt{2\mu_r \mu_0 \sigma_{\text{Al}} \omega}}, \quad (12)$$

где σ_{Al} – удельная электрическая проводимость сплава, См/м; $\omega=2\pi f$ – циклическая частота тока, Гц.

Здесь f – частота индуцированного тока, которая может быть определена как

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_0}}. \quad (13)$$

Подставив в выражение (10) формулы (9) и (11), получим

$$Q = \int_0^T H_{\text{и}}^2(t) \cdot (r_2 - r_1)^2 \frac{1}{\sigma_{\text{Al}} \cdot \delta_{\text{скин}}} dt. \quad (14)$$

В свою очередь временную зависимость напряженности магнитного поля можно представить, как

$$H_{\text{и}}(t) = H_0 \cdot \varphi(t), \quad (15)$$

где H_0 – амплитудное значение напряженности поля на поверхности расплава, А/м;

$\varphi(t)$ – функция, которая описывает временную зависимость напряженности магнитного поля.

Для оценок примем [10, 11], что

$$\varphi(t) = \sin \omega(t). \quad (16)$$

Тогда, подставив выражение (15) в (14), с учетом (12) запишем

$$Q = H_0^2 \cdot (r_2 - r_1)^2 \sqrt{\frac{\mu_0 \pi f}{\sigma_{\text{Al}}}} \int_0^T \varphi^2(t) dt. \quad (17)$$

Подставим (16) в (17), возьмем интеграл при

$$t \in \left[0, \frac{\pi}{\omega}\right]$$

и получим

$$Q = H_0^2 \cdot (r_2 - r_1)^2 \sqrt{\frac{\mu_0 \pi f}{\sigma_{\text{Al}}}} \frac{1}{4 \cdot f}. \quad (18)$$

Если обозначить

$$\frac{(r_2 - r_1)^2}{4} \sqrt{\frac{\mu_0 \pi}{\sigma_{\text{Al}}}} = K,$$

то получим выражение, удобное для анализа.

$$Q = H_0^2 \cdot K \sqrt{\frac{1}{f}}. \quad (19)$$

Результаты и обсуждение. Результаты расчётов по влиянию h и соотношения r_1 и r_2 на характеристики индукторной системы представлены далее на рис. 3–5.

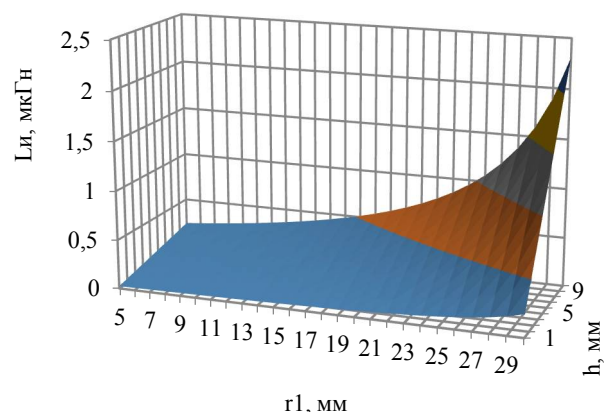


Рис. 3 – Индуктивность системы «Индуктор–Расплав» в зависимости от величины зазора h и r_1

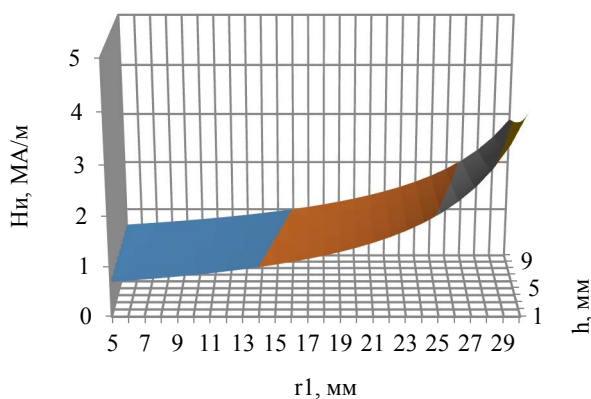


Рис. 4 – Напряженість магнітного поля в об'ємі між індуктором і расплавом в залежності від величини зазора h і r_1

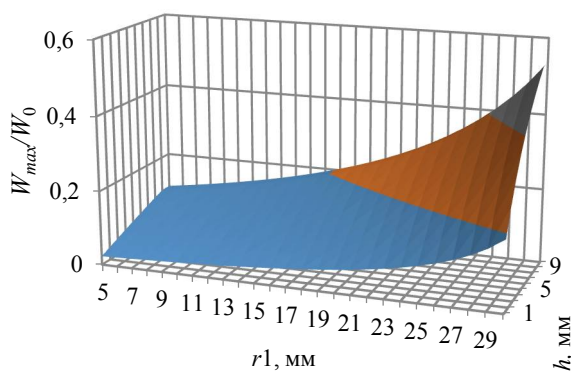


Рис. 5 – Ефективність перетворення електричної енергії в магнітну в залежності від величини h і r_1

Из полученных зависимостей (рис. 3–5) можно видеть, что, хотя величина зазора h и увеличивает к.п.д. системы «Индуктор–Расплав», но при этом существенно снижает величину напряженности магнитного поля, что естественно отрицательно сказывается на амплитудном значении пропорциональных квадрату H_m генерируемых в расплаве пондеромоторных сил. Варьирование соотношением внешнего (r_2) и внутреннего (r_1) радиусов индуктора позволяет существенно (более чем на 35 %) повысить эффективность преобразования электрической энергии в магнитную в системе «Индуктор–Расплав», увеличивая одновременно напряженность магнитного поля H_m . Таким образом, варьирование соотношением r_1 и r_2 более выгодно, чем увеличение h . Суммарное же увеличение эффективности преобразования энергии от варьирования геометрических параметров h , r_1 , r_2 может быть получено более чем в пятнадцать раз (от 3 до 53 %). Однако здесь следует учитывать, что создание относительно узкого многovitкового индуктора сопряжено с рядом неучтенных в оценке параметров и конструктивных сложностей:

- резкого скин-эффекта;
- возможностей межвиткового пробоя;
- тепловой и электродинамической стойкости.

Выполнение же индуктора, например, одновитковым, существенно снижает эффективность данной системы, т.к. в выражениях (4), (5), (8) количество витков присутствует во второй степени.

На основании выражения (19) для $H_0 = const$ построена зависимость $Q_{отн} = Q/Q_{max}$, при $Q = const$ и зависимость квадрата максимальной амплитуды магнитного поля $H_{отн}^2$ ($H_{отн} = H_0/H_{0max}$) от частоты тока (см. рис. 6).

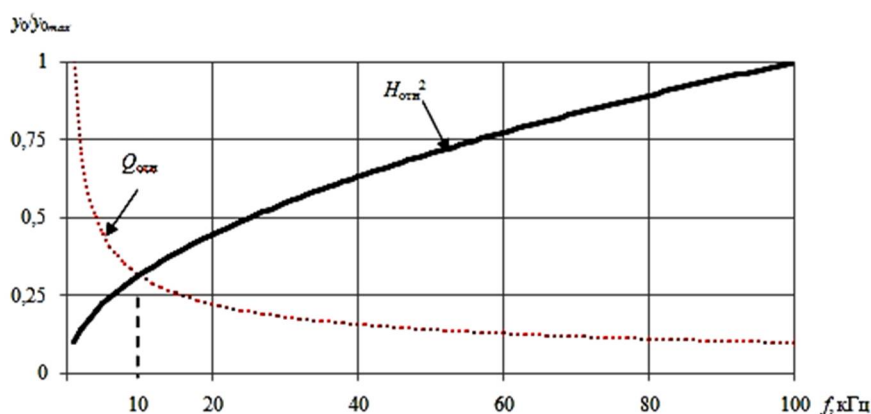


Рис. 6 – Зависимость количества тепла $Q_{отн}$ и квадрата максимальной амплитуды магнитного поля $H_{отн}^2$ от частоты тока

Из приведенной на рис. 6 зависимости следует, что частота 10 кГц является той границей, которая определяет области эффективного теплового и силового воздействия на расплав. Этот результат является очень важным как с точки зрения технологического, так и технического аспекта реализации МИО расплавов. Например, при необходимости поддержания температуры расплава или его тепловой обработки необходимо реализовывать частоту разрядного тока менее 10 кГц, что, конечно же, требует повышенной энергоёмкости используемого высоковольтного оборудования. Для минимализации же теплового воздействия, чтобы при этом получить наиболее интенсивное воздействие пондеромоторных сил ($\sim H_0^2$) на обрабатываемый металл, при относительно небольших энергетических параметрах генератора импульсных токов, необходимо увеличивать частоту разрядного импульса. Вышесказанное особенно важно для обработки расплавов в форме и решения задач термообработки расплавов.

Выводы. 1. Методами математического моделирования установлены условия и особенности трансформации энергии в системе «Индуктор-Расплав» в зависимости от геометрических параметров данной системы и частотных параметров импульсного магнитного поля.

2. Установлено, что геометрические параметры системы «Индуктор-Расплав» существенно и нелинейно влияют на эффективность преобразования энергии, выделяемой в индукторе в магнитную энергию, которая совершает работу над обрабатываемым расплавом. Варьированием геометрических параметров можно повысить к.п.д. преобразования энергии в системе «Индуктор-Расплав» с 3 до 53 %, т.е. более чем в пятнадцать раз.

3. Показано, что увеличение промежутка между индуктором и расплавом увеличивает эффективность преобразования энергии, но снижает амплитуду силового воздействия на расплав. Уменьшение внутреннего радиуса индуктора позволяет повысить и эффективность преобразования энергии и силовое воздействие.

4. Установлено наличие границы эффективных теплового или силового воздействий (10 кГц), которое показывает, что при частотах свыше 10 кГц существенно снижается тепловая энергия, выделяемая при прохождении индуцированного тока через расплав, и повышается доля энергии, которая идет на работу, совершаемую пондеромоторными силами.

Список литературы: 1. *Li Bo*. Effect of temperature field on solidification structure of pure Al under pulse magneto-oscillation / *Bo Li*., *Yin Zhenxing*., *Yong Youngyoung*., [etal.] // *China foundry*.-

1988.- Vol. 8(2).- P. 172-176. 2. *Черников Д. Г.* Исследование влияния обработки расплавов импульсным магнитным полем высокой напряженности на структуру и свойства алюминиево-кремниевых сплавов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец 05.16.04 «Литейное производство» / *Черников Дмитрий Геннадьевич*; ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)». – Самара, 2011. – 26 с. 3. *Синчук А. В.* Силовое магнито-импульсное воздействие на твердожидкий алюминиевый сплав А357 / *А. В. Синчук*, *В. Н. Цуркин*, *А. В. Иванов* [и др.] // *Процессы литья*. – 2012. – № 5. – С. 43–53 4. *Чугунный Е. Г.* Магнитоимпульсная обработка кристаллизующихся расплавов / *Е. Г. Чугунный* // *Литейное производство*. – 1996. – № 1. – С12–14. 5. *Pe, Ning* Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al/ *Ning Pei*, *Gong Yongyong*, *Li Renxing*, [etal.] // *China foundry*.-2011. - Vol. 8(1).- P. 41–50. 6. *Батыгин Ю. В.* Физические основы возможных направлений развития магнито-импульсной обработки тонкостенных металлов / *Ю. В. Батыгин*, *В. И. Лавинский*, *Л. Т. Хименко* // *Электротехника и электромеханика*. – 2004. – № 2. – С. 80–84. 7. *Белый И. В.* Справочник по магнито-импульсной обработке металлов / *И. В. Белый*, *С. М. Фертик*, *Л. Т. Хименко*. – Харьков: Вища школа.–1970. – 190 с. 8. *Череповский С. С.* Управляющие параметры магнито-импульсной обработки расплава / *С. С. Череповский* // *Металл и литье Украины*. – 2014. – №. 12. – С. 32–33. 9. *Подольцев А. Д.* Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в проводящих средах / *А. Д. Подольцев*, *И. Н. Кучерявая*. – К.: Изд-во Ин-та электродинамики НАН Украины, 1999. – 363 с. 10. *Шнеерсон Г. А.* Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов / *Г. А. Шнеерсон*. –М.: Энергоатомиздат, 1992. – 416 с. 11. *Михайлов В. М.* Импульсные электромагнитные поля / *В. М. Михайлов*. – Харьков: Высшая школа, 1979.– 140 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Li Bo*, et al. «Effect of temperature field on solidification structure of pure Al under pulse magneto-oscillation» *China foundry* 8.2 (1988): 172–176. Print 2. *Chernikov D. G.* Issledovanie vlijaniya obrabotki rasplavov impul'snym magnitnym polem vysokoj napryazhennosti na strukturu i svojstva aljuminievo-kremnievych spлавov: *Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk.*– Samara, 2013. Print 3. *Sinchuk A. V.*, et al. «Silovoe magnito-impul'snoe vozdejstvie na tverdozhidkij aljuminievij spлав A357» *Processy lit'ja* 5 (2012): 43–53. Print 4. *Chugunnyj E. G.* «Magnitoimpul'snaja obrabotka kristallizujushihhsja rasplavov» *Litejnoe proizvodstvo* 1 (1996): 12–14. 5. *Pe, Ning*, et al «Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure» *China foundry* 8.1 (2011): 41–50. 6. *Batygin Ju. V. Lavinskij V. I., Himenko L. T.* «Fizicheskie osnovy vozmozhnyh napravlenij razvitija magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennyh metallov» *Elektrotehnika i elektromehaniка* 2 (2004): 80–84. 7. *Belyj I. V., Fertik S. M. and Himenko L. T.* *Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov*. Kharkov: Vishha shkola, 1970. Print. 8. *Cherepovskij S. S.* «Upravljajushhie parametry magnitno-impul'snoj obrabotki rasplava» *Metall i lit'e Ukrainy* 12 (2014): 32–33. 9. *Podol'cev A. D and Kucherjavaja I. N.* *Jelementy teorii i chislennoho raschjota jelektromagnitnyh processov v provodjashhijh sredah* – Kyiv: Izd-vo In-ta jelektrodinamiki NAN Ukrainy, 1999. Print. 10. *Shneerson G. A.* *Polja i perehodnye processy v apparature sverhsil'nyh tokov*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1992. Print. 11. *Mihajlov V. M.* *Impul'snye jelektromagnitnye polja*. Kharkov: Vysshaja shkola, 1979. Print.

Поступила (received) 25.11.2015

Сведения об авторах / About the Authors

Иванов Артем Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (0512) 58-71-42; e-mail: dpta@iipt.com.ua.

Череповский Сергей Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий, г. Николаев; тел.: (0512) 58-71-42; e-mail: dpta@iipt.com.ua.

Ivanov Artem Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), research officer of Institute of pulse processes and technologies of the National academy of science of Ukraine, Mykolaiv; тел.: (0512) 58-71-42; e-mail: dpta@iipt.com.ua.

Cherepovskij Sergej Sergeevich – postgraduate student, research assistant of Institute of pulse processes and technologies of the National academy of science of Ukraine, Mykolaiv; тел.: (0512) 58-71-42; e-mail: dpta@iipt.com.ua.