

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ПРОТЕКАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА В МАССИВНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОТОКОВОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВА

В.Н. Цуркин, А.В. Мельник, А.В. Иванов

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

Введение

Повышение качества литой металлопродукции как основная научно-техническая проблема литейного производства решается совокупностью различных приемов и способов, в том числе обработкой жидкого и кристаллизующегося металла физико-техническими методами, основанными на разных физических принципах воздействия. Функциональные возможности этих методов многопараметрические и многоцелевые, но единого универсального метода, способного одинаково эффективно воздействовать на качественные показатели литого металла, в настоящее время не существует. В настоящее время этот вопрос изучается как в направлении совершенствования традиционных методов, так и в сфере поиска альтернативных технологических приемов обработки. Одним из новых методов является обработка жидкого и кристаллизующегося металла импульсно-периодическим электрическим током. К сожалению, работы по данной тематике, в связи с недостаточной изученностью процессов электроимпульсной обработки жидкометаллических сред, не получили своего инновационного развития, хотя некоторыми авторами выдвинуты гипотезы о возможных механизмах импульсно-периодической электротокковой обработки [1–3].

Процессы обработки металлических расплавов переменным и импульсно-периодическим электрическим током сопряжены с генерированием в проводнике вихревого электрического поля самоиндукции, которое при увеличении частоты тока приводит к появлению скин-эффекта, то есть вытеснению тока к поверхности проводника. Вихревое электрическое поле самоиндукции, возникающее в проводнике при прохождении в нем переменного тока, противодействует изменению тока внутри проводника и способствует его изменению вблизи поверхности, т.е. плотность переменного тока максимальна на поверхности проводника и минимальна на его оси. В случае же высокочастотных токов плотность тока отлична от нуля только в тонком слое вблизи поверхности проводника, что накладывает свои особенности на механизмы электротокковой обработки материалов, причем для массивных проводников скин-эффект проявляется при меньших значениях частоты [4].

Для синусоидального переменного тока распределение электромагнитного поля и тока по сечению проводника, соотношения активной и реактивной мощностей, толщины скин-слоя δ и некоторого эффективного сопротивления проводника, превосходящего по величине сопротивление постоянному току, в зависимости от частоты и отношения δ/r (где r – радиус проводника), достаточно изучены [5]. Для импульсно-периодического тока, зависимость которого $I = I(t)$ при установившемся режиме отлична от синусоиды, вопрос о характере и распределении тока, импульсного электромагнитного поля, величине и наличии скин-слоя в массивных проводниках остается открытым [6]. Решение этих задач для каждого конкретного случая весьма сложная и актуальная проблема.

В данной статье предлагается использовать метод спектрального анализа [7] для исследования характера протекания импульсного тока.

Цель работы – на примере массивного цилиндрического жидкометаллического проводника методом спектрального анализа исследовать характерные особенности протекания импульсного тока для различных режимов разряда емкостного накопителя при электротокковой обработке расплава.

Спектральный анализ

Рассмотрим экспериментальные кривые $I=I(t)$ для трех характерных режимов разряда емкостного накопителя (рис. 1) – колебательного ($\eta=0,37$), согласованного ($\eta=0,79$) и апериодического ($\eta=1$). Здесь η – доля энергии, выделившейся в первый полупериод разрядного тока.

При импульсно-периодическом режиме в одном импульсе ток имеет характер затухающей синусоиды, то есть его спектральная характеристика будет занимать широкую область частот, в отличие от переменного тока, для которого вся энергия (теоретически) выделяется на одной частоте.

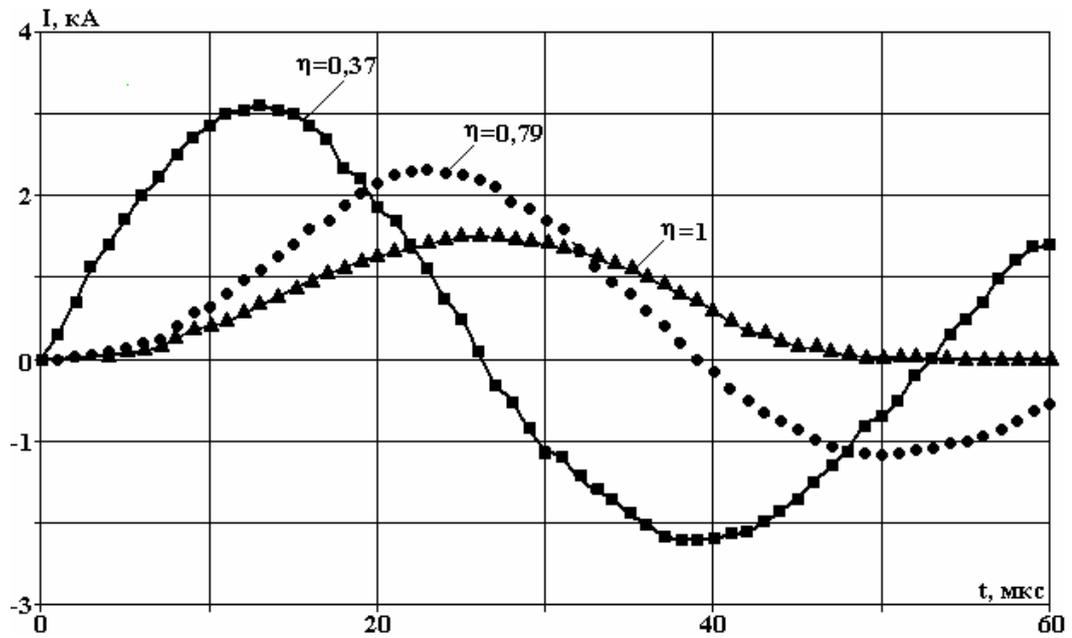


Рис. 1. Экспериментальные осциллограммы тока при различных режимах разряда

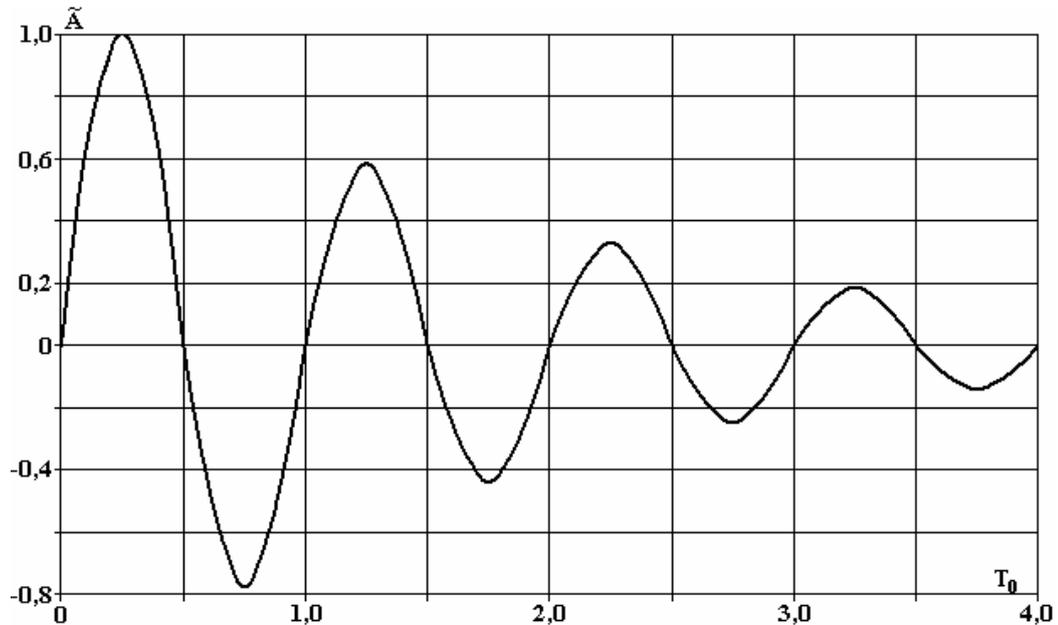


Рис. 2. Характерная осциллограмма тока при электротокковой обработке расплава

Характерная осциллограмма импульсного тока при электротокковой обработке расплава представлена на рис. 2. Данные приведены в относительных единицах. По оси ординат расположена относительная амплитуда тока $\tilde{A} = A/A_{max}$, а по оси абсцисс – относительное время $T_0 = t/\tau$ (τ – период колебаний тока). Продолжительность импульса составляет 4τ .

Спектральный анализ таких функций, полностью определенных на отрезке времени от 0 до T , заключается в вычислении составляющих их комплексной спектральной плотности $S(\omega)$ [7]:

$$S(\omega) = S_c(\omega) + iS_s(\omega),$$

где ω – угловая частота.
$$S_c(\omega) = \int_0^T I(t) \cos \omega t dt; S_s(\omega) = \int_0^T I(t) \sin \omega t dt.$$

Модуль спектральной плотности
$$\Phi(\omega) = \sqrt{[S_c(\omega)]^2 + [S_s(\omega)]^2}.$$

Обсуждение результатов

Спектры кривых тока для исследуемых режимов разряда приведены на рис. 3. Как видно из графиков, спектральная плотность тока выше для колебательного режима, когда первый максимум соответствует области частот 15–20 кГц, а второй наблюдается вблизи 44 кГц. Практически на всем частотном диапазоне имеют место периодические максимумы, но со значительно меньшими значениями спектральной плотности. Аperiodическому режиму соответствует наименьшая спектральная плотность, первый максимум расположен в диапазоне 0–5 кГц, второму соответствует область 50 кГц. Для согласованного режима разряда спектральная плотность занимает промежуточное положение, первый максимум находится в частотном диапазоне 12–16 кГц, а второй – в области 45 кГц. Следовательно, для электротокерной обработки расплавов энергетически более выгодно применять колебательный режим разряда, при котором параметры воздействия будут максимальны. Отметим, что наиболее предпочтительным для практического использования при электрогидроимпульсной обработке также является колебательный режим разряда, обеспечивающий максимальные уровни давлений в расплаве и ширину акустического спектра [8]. Сравнивая плотности спектральных характеристик разрядного тока для разных значений η на одних и тех же частотах, можно заключить, что функциональные возможности обработки на какой-либо конкретной частоте для каждого из режимов будут различны. С учетом того, что эффективность процессов, протекающих в расплаве и оказывающих благоприятное воздействие на структуру литого металла (джоулев нагрев, воздействие электромагнитной силы, электроперенос, изменение кинематики включений и т.д.), в случае непосредственного пропускания тока через обрабатываемый расплав определяется величиной I , колебательный режим имеет существенные преимущества.

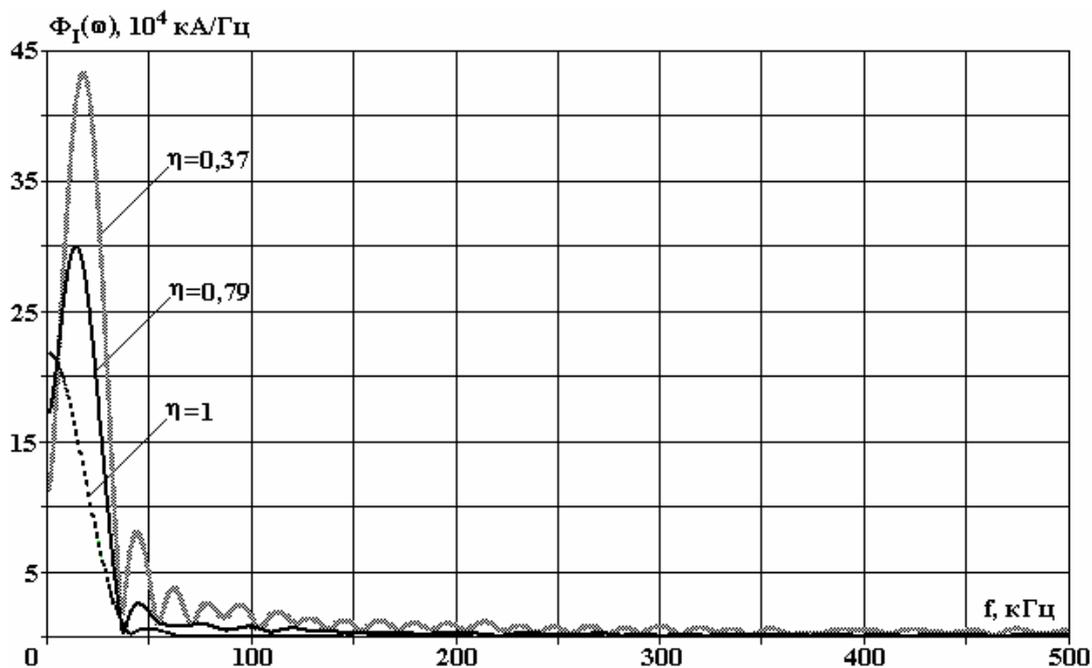


Рис. 3. Спектры тока при различных режимах разряда

Таким образом, использование колебательного режима электрического разряда позволяет наиболее эффективно обрабатывать расплавы, оказывая воздействие на различные структурные уровни металла [9].

Основные механизмы влияния электротокерной обработки на состояние расплава следует связывать с воздействием на скорость зародышеобразования, зависящую от изменения разности свободных энергий между жидкостью и твердым состоянием и изменения межфазной поверхностной энергии [10]. Степень воздействия данного механизма на обрабатываемый металл определяется процессами, на которые существенно влияет неравномерность распределения тока и импульсного электромагнитного поля в жидкометаллическом проводнике: джоулев нагрев, способствующий уменьшению температурного градиента на границе «расплав-стенка ковша» (благодаря нагреванию скин-слоя тормозится гетерогенное зародышеобразование на стенках формы); пинч-эффект – сжимающая расплав электромагнитная сила, направленная от боковой поверхности к центру проводника (препятст-

вует зародышеобразованию на стенках формы). Согласно рис. 3 для колебательного режима при относительно малой толщине скин-слоя плотность тока в нем будет максимальна (максимум спектральной плотности тока соответствует большей частоте) по сравнению с другими режимами. Это свидетельствует о существенном влиянии режима разряда емкостного накопителя на процессы и механизмы импульсной электротокковой обработки расплавы, максимальные эффекты воздействия которых соответствуют колебательному режиму.

Проанализируем спектры импульсного тока (рис. 2) при различных соотношениях его периода и амплитуды. На рис. 4 представлены спектры при относительной амплитуде тока \tilde{A} , $10\tilde{A}$ и $0,1\tilde{A}$, а также для случаев, когда его периоды составляют $0,1\cdot T_0$ и $10\cdot T_0$. По оси абсцисс отложена относительная частота f/f_0 , где f_0 – несущая частота импульсного тока. Качественная картина спектров практически одинакова, а количественная отличается на порядки. Следует отметить идентичность спектров при $0,1\tilde{A}$ и $0,1\cdot T_0$, а также при $10\tilde{A}$ и $10\cdot T_0$. Таким образом, при электротокковой обработке расплава для получения необходимых параметров воздействия нужно варьировать либо амплитудным значением импульсного тока, либо продолжительностью импульса. Так как повышение амплитуды тока нецелесообразно по энергетическим затратам и ограничено эксплуатационными характеристиками применяемого оборудования, то увеличение продолжительности импульсов тока является более выгодным и конструктивно реализуемым способом управления параметрами обработки.

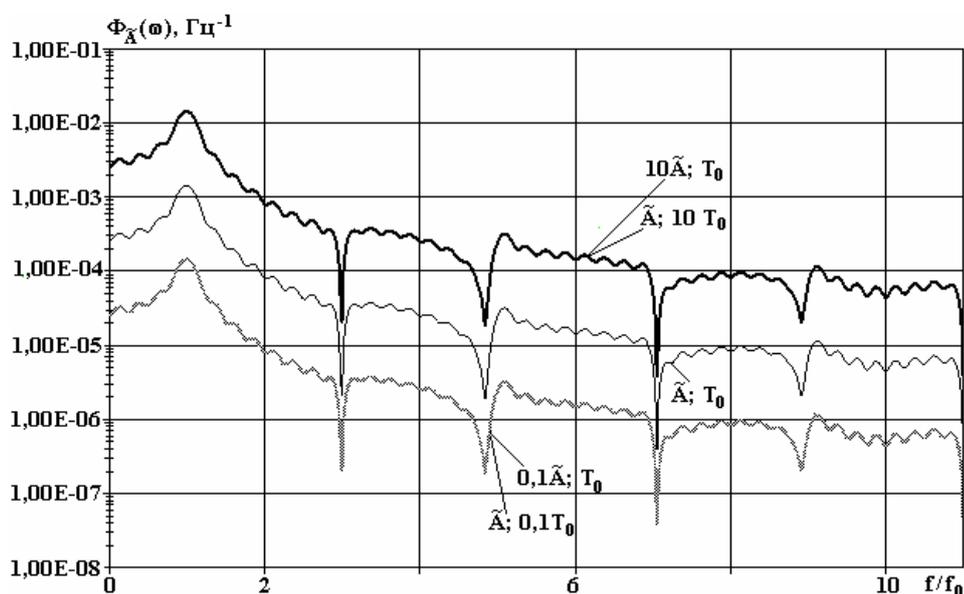


Рис. 4. Спектры тока при различных значениях относительных амплитуды и времени

Кроме того, были проанализированы спектры временной зависимости тока (рис. 2) при усечении кривой до 3τ , 2τ , τ , $\tau/2$, $\tau/4$ и $\tau/8$. С уменьшением времени колебаний тока спектральная плотность снижается (наиболее интенсивно на участке от τ до $\tau/8$), но при этом значительно расширяется частотный диапазон воздействия.

Выводы

Таким образом, на основании спектрального анализа временных зависимостей импульсного тока можно заключить, что наиболее эффективным для импульсной электротокковой обработки расплава является колебательный режим разряда емкостного накопителя (спектральная плотность на порядок выше, чем у согласованного, и на два порядка – чем у аperiodического).

Определены приемы управления параметрами импульсного воздействия – амплитудой и продолжительностью импульса тока. Показано, что наиболее предпочтительным по энергетическим затратам является метод управления продолжительности импульсов тока, что соизмеримо по эффекту воздействия с повышением его амплитудного значения на тот же порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вильский Г.Б., Фарнасов Г.А. Импульсное пондеромоторное воздействие на кристаллизующийся металл. *Электрический разряд в жидкости и его применение в технологии машиностроения и ме-*

- таллообработки. Тез. докл. I Всес. научно-техн. конф. (Николаев, сентябрь 1976). Киев: Наук. думка, 1976. 78–79.
2. Вернидуб А.Г., Волков Г.В., Грабовый В.М., Семенченко А.И., Федченко Н.А. и др. Обработка сплава АК7 импульсным электрическим током. *Процессы литья*. 2005, (1), 64–67.
 3. Rongshan Qin. Solidification under electropulsing /Rongshan Qin/. *International Journal of Cast Metal Research*. 2007, **25**(7), 92–98.
 4. Компан Я.Ю., Щербинин Э.В. *Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами*. М.: Машиностроение, 1989. 272 с.
 5. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов*. М.: Высшая школа, 1986. 263 с.
 6. Шнейерсон Г.А. *Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов*. Л.: Энергоиздат. 1981. 200 с.
 7. Харкевич А.А. *Спектры и анализ*. М.: Физматиз. 1962. 236 с.
 8. Tsurkin V.N., Sinchuk A.V., Ivanov A.V. A computational technique for determining the influence of the parameters of a discharge on the characteristics of an acoustic field in a melt subjected to electrohydropulse treatment. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2004, **40**(2), 84–90.
 9. Tsurkin V.N., Sinchuk A.V., Ivanov A.V. Influence of electric discharge regime on the quality of the metal that is subjected to electrohydroimpulsive processing in the liquid state. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2005, **41**(1), 96–102.
 10. Флемингс М. *Процессы затвердевания*. Пер. с англ.; под ред. А.А.Жукова, Б.В. Рабиновича. М.: Мир, 1977. 423 с.

Поступила 15.07.10

Summary

The paper demonstrates the results of spectral analysis of time dependencies of the current at melt treatment by electric current. It is established that the most favorable conditions for treatment are achieved at an oscillating mode of a discharge. The possibility is shown of control over the parameters of influence due to current pulses time.
