

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение

Любая технология обработки материалов должна обеспечивать стабильность закономерно повторяющихся процессов. Только в этом случае можно ожидать высокий процент выхода качественной продукции. При использовании в технологии методов, основанных на обработке физическими полями, решение этого вопроса существенно зависит от стабильности параметров нагружения, то есть внешние структуроформирующие параметры (ВСФП) должны закономерно стабильно повторяться с минимальным разбросом. С другой стороны, управление процессами, приводящими к внутренним структурно-кинетическим изменениям (ВСКИ) в объекте обработки, возможно за счет варьирования ВСФП, поэтому здесь необходимо определить процессы, наиболее чувствительные к изменению того или иного параметра. Физико-технические методы, применяемые в технологических операциях процессов обработки материалов, являются, как правило, многопараметрическими, многофункциональными и многоцелевыми. Поэтому задачи стабилизации параметров нагружения с точки зрения их закономерной повторяемости с минимальными разбросами значений должны решаться системным подходом, когда анализируется совокупность всех основных параметров входа и выхода системы, а также определяются наиболее чувствительные связи между ВСФП и ВСКИ. Актуальность такого подхода очевидна, так как выявление условий стабилизации закономерно повторяющихся процессов обработки позволит не только стабильно ими управлять, но и показать пути повышения эффективности обработки.

Академическую постановку указанной задачи можно представить в рамках теории систем. Прикладной ее аспект рассмотрим для технологического метода электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) расплава перед его разливкой. Технологическая схема такого рода приведена на рис. 1. Источником поля давлений в объекте обработки (жидком металле) является электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК), который через передающий упругий элемент (мембрану с волноводом) воздействует на расплав посредством акустических волн.

Параметрами нагружения при ЭГИО являются выходные характеристики ЭРГУК – инструмента воздействия на обрабатываемый объект. То есть в качестве ВСФП выступают амплитуда и скорость перемещения торца волновода, давление на его торце, длительность и частота посылки импульсов, время обработки. Функциональные возможности обработки определяются формированием в расплаве физических процессов – ВСКИ (генерирование нестационарного поля давлений, акустическая кавитация, развитие локальных акустических потоков и течений и т.п.), способствующих дегазации, рафинированию от вредных примесей, гомогенизации расплава, активации потенциальных центров зародышеобразования за счет варьирования параметров нагружения.

Цель данной работы – провести системный анализ физико-технических факторов стабилизации ВСФП при ЭГИО расплава и определить их степень влияния на формирование ВСКИ в объекте обработки.

Заметим, что формирование ВСКИ в расплаве является многофункциональным, так как сценарии этих процессов определяются влиянием множества факторов [1]. Вместе с тем современный научный и практический опыт позволяет выделить и описать их достаточно точно.

Системный анализ

Добиться минимального разброса ВСФП можно оптимальным подбором параметров разрядного контура; геометрических размеров и формы разрядной камеры, мембраны и волновода; свойств

рабочей жидкости, заполняющей разрядную камеру; объемного содержания воздуха в верхней части разрядной камеры. Назовем их входными параметрами источника возмущений. Покажем их влияние на диапазон изменения ВСФП. Будем полагать, что чем он меньше при максимальных изменениях входных параметров, тем стабильнее процесс. С учетом введенной терминологии представим систему факторов способа ЭГИО расплава, влияющих на разброс ВСФП, а значит, и на показатели качества литого металла в виде схемы, изображенной на рис. 2.

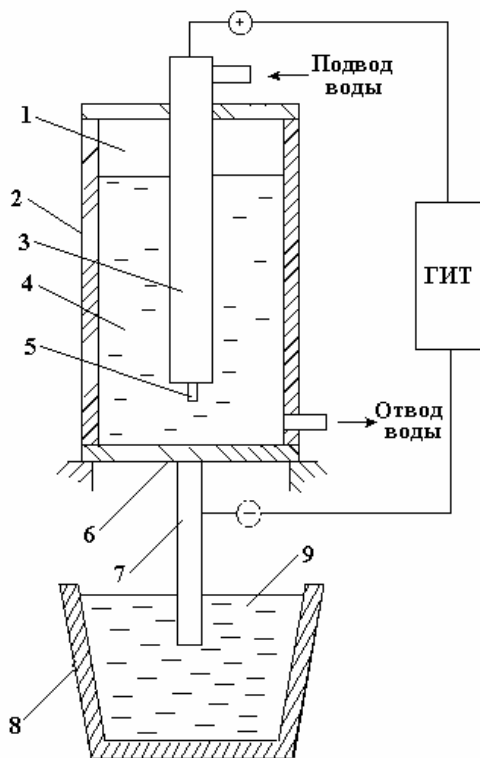


Рис.1. Схема ЭГИО расплава ЭРГУК:

1 – воздушная полость; 2 – разрядная камера; 3 – электрод; 4 – рабочая жидкость;
5 – токовод; 6 – мембрана; 7 – волновод; 8 – ковш; 9 – расплав



Рис. 2. Система факторов, обеспечивающих стабильность ЭГИО

Подбор входных характеристик ЭРГУК для обеспечения минимального разброса выходных параметров нагружения базируется на анализе теоретических и экспериментальных работ по практи-

ческому применению ЭГИО расплава в ковше. Выполним детальный анализ каждого из приведенных входных параметров инструмента воздействия и определим их вклад в разброс ВСФП.

Влияние характеристик разрядного контура на стабилизацию параметров нагружения.

На стабилизацию параметров нагружения оказывают влияние следующие характеристики разрядного контура (как показано в [2], именно эти параметры определяют электрические и электродинамические характеристики разрядного контура, а также гидродинамические и акустические характеристики жидкости в разрядной камере): напряжение на обкладках конденсаторов U_0 , емкость конденсаторной батареи C , индуктивность контура L , длина межэлектродного (разрядного) промежутка l_p . Оптимальной с точки зрения максимального значения КПД преобразования электрической энергии является длина промежутка, соответствующая равенству его активного (R_a) и волнового сопротивлений контура ($\sqrt{L/C}$).

В работах многих авторов, исследовавших различные технологические приложения электро-взрывных процессов в жидкости, используется интегральный параметр нагружения – запасаемая энергия $W_0 = CU_0^2/2$. При этом показано ее влияние в разных диапазонах изменения на характеристики обрабатываемых материалов и сред. Заметим, что зачастую здесь не учитывались время выделения энергии ($\tau \sim \pi\sqrt{L/C}$), а также соотношение R_a и $\sqrt{L/C}$. Такой подход не позволял выявить системность в анализе влияния параметров нагружения на характеристики объекта обработки. Покажем это, проанализировав ранние результаты исследований характеристик нагружения расплава при ЭГИО.

Естественно предположить, что увеличение W_0 приводит к росту амплитуды колебаний рабочего элемента ЭРГУК. Эксперимент показал [3], что с повышением W_0 от 0,625 до 2,5 кДж за счет увеличения C от 0,5 до 2 мкФ при $U_0 = 50$ кВ происходит увеличение максимального прогиба мембраны ЭРГУК толщиной $\delta_m = 6,3$ мм от 2,6 до 7 мм при оптимальном l_p . То есть увеличение W_0 в 4 раза приводит к увеличению прогиба в 2,7 раза. Однако для ЭГИО рабочим элементом является не мембрана, а торец волновода, поэтому данные результаты являются малоинформативными. Теоретические исследования, проведенные в [4], подтвердили, что амплитуда колебаний торца волновода A_b растет с увеличением W_0 , кроме того, возрастает и продолжительность кавитационных процессов в расплаве (временные промежутки между импульсами давления в жидком металле, когда оно падает до нуля либо не превосходит начального атмосферного). В [5] показано, что с повышением W_0 увеличиваются A_b и длительность основного перемещения, а частота затухающих колебаний практически не изменяется. Но остается открытым вопрос: является ли оптимальный l_p с точки зрения электрического КПД оптимальным для формирования в расплаве максимально возможных значений силовых факторов обработки?

В работе [6] методом мерного стержня исследована зависимость параметров импульса давления, действующего на нижний торец стержня, от l_p и C , то есть из четырех указанных параметров варьировались только два. Авторами сделаны оценки среднего давления в импульсе P_s и его длительности τ_0 в определенных интервалах C и l_p . Так, например, при $l_p = 5$ мм наибольшее P_s достигается при значении $C = 0,5$ мкФ, но при минимальной τ_0 . При $l_p = 45$ мм максимум P_s и τ_0 соответствует $C = 1,5$ мкФ. Анализируя эти результаты, можно заключить, что минимальный разброс P_s и τ_0 достигается при одновременном увеличении как l_p , так и C . Это вполне оправдано физически, так как увеличение C влечет за собой повышение W_0 и амплитуды разрядного тока ($\sim U_0/\sqrt{L/C}$), а также увеличение его периода ($\sim \pi\sqrt{L/C}$). В пределах одного разрядного промежутка l_p увеличение C должно приводить к повышению W_0 и, как отмечено в [3], к росту P_s . Заметим, что анализируемые в [6] параметры соответствуют колебательному режиму разряда со значением доли энергии, выделившейся в первый полупериод тока η [2], до 0,4. Поэтому данные результаты на практике использовать проблематично. Но заметим, что при $\eta < 0,4$ системности результатов в работе [6] нет, кроме того, они не соответствуют результатам, полученным в [3].

Авторы [7], на основании результатов экспериментальных исследований прогиба мембраны при разряде в закрытом объеме, утверждают, что при условии $W_0 = \text{const}$ максимальное смещение упругий элемент совершает при более низких значениях U_0 , а значит, при больших значениях C , что свидетельствует о важности параметра $\sqrt{L/C}$ в формировании динамики мембраны. При этом с увеличением W_0 от 0,1 до 2 кДж разница в смещении мембраны толщиной $\delta_m = 12$ мм и диаметром $d_m = 500$ мм возрастает от 1,7 до 3 раз. Аналогичное соотношение для режимов разряда с постоянным и различным значением W_0 сохраняется также и для соответствующих каждому смещению ускоре-

ний. В этой же работе проведена оценка скоростей перемещения центральной части мембраны в зависимости от W_0 . Установлено, что скорость перемещения зависит от режима выделения энергии в канале разряда, причем при $W_0 = \text{const}$ с ростом U_0 скорость перемещения уменьшается. Выявлена область насыщения, вне которой увеличение W_0 нерационально с точки зрения повышения скорости перемещения. Важность этого эксперимента в нашем случае заключается в том, что режим выделения энергии η как интегральный параметр разрядного контура влияет на динамику упругого элемента. Но, к сожалению, этот качественный результат не подкреплен в работе [7] количественными данными, что также не дает оснований к построению системного подхода при анализе стабильности нагружения жидкого металла.

В работе [8] получены зависимости выходных параметров ЭРГУК от совокупности четырех указанных параметров разрядного контура, что соответствует системному подходу в решении данной задачи и позволяет четко выявить пути стабилизации ВСФП, а также получить возможность управлять ВСКИ. Здесь приведены соотношения давления на торце волновода $P_b(t)$ при трех режимах выделения энергии η (1; 0,8; 0,37), соответствующих аperiодическому, согласованному (оптимальному с точки зрения электрического КПД) и колебательному характеру протекания тока на межэлектродном промежутке:

$$\begin{cases} P_b(t) = 19,44 \cdot \frac{U_0}{r^2} \cdot L^{-1,97} \cdot C^{-0,97} \cdot t^{3,44} \cdot \exp\left(-0,94 \cdot \frac{t}{\sqrt{L \cdot C}}\right), & \text{при } \eta = 0,37; \\ P_b(t) = 3,1 \cdot \frac{U_0}{r^2} \cdot L^{-2,115} \cdot C^{-1,115} \cdot t^{3,74} \cdot \exp\left(-0,86 \cdot \frac{t}{\sqrt{L \cdot C}}\right), & \text{при } \eta = 0,8; \\ P_b(t) = 0,73 \cdot \frac{U_0}{r^2} \cdot L^{-1,96} \cdot C^{-0,96} \cdot t^{3,42} \cdot \exp\left(-0,42 \cdot \frac{t}{\sqrt{L \cdot C}}\right), & \text{при } \eta = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где r – радиус стержня волновода.

Соотношения (1) показывают, что анализировать $P_b(t)$ нужно не только в зависимости от U_0 , C , L , l_p , но и от r . Причем $P_b(t)$ наиболее чувствительно к изменению r . Максимальных значений P_a^{max} приобретает при $\eta = 0,37$, что указывает на то, что согласованный режим разряда не является оптимальным с точки зрения получения максимальных нагружающих факторов в расплаве.

Таким образом, анализируя соотношения (1), можно выстроить входные параметры ЭРГУК в порядке их влияния на стабильность нагружения расплава от большего к меньшему (r , U_0 , C , L), не зависимо от l_p .

Для одной установки мы четко стабилизируем значения r , U_0 и C . При этом необходимо в процессе проектирования установки минимизировать величину L и добиться того, чтобы соединяющие кабеля были максимально закреплены в пространстве, так как L зависит от их взаимного расположения.

В полученных соотношениях при постановке задачи учитывалось напряжение, при котором начинается разряд U_p , но всегда $U_p < U_0$, так как возникают потери электрической энергии. Поэтому для практического использования формул (1) в плане выработки требований к условиям стабилизации нагружения следует минимизировать разброс в разности ($U_p - U_0$), что технически реализуемо.

Связь геометрических характеристик конструктивных элементов установки с параметрами нагружения. Управление волновой составляющей передаваемой нагрузки на разрядной стадии целесообразно осуществлять за счет параметров разрядного контура и диаметра волновода d_b , а колебательной составляющей на послеразрядной стадии – варьированием геометрических характеристик камеры ЭРГУК [5, 8]. Причем, как отмечается в [7], характерной особенностью упругого движения подвижного элемента под действием импульсной нагрузки является наличие двух гармоник: высшей гармоники, связанной с высокочастотными колебаниями центральной части мембраны, и низшей гармоники ее основного перемещения. Такое явление характерно практически для любых параметров разрядного контура, то есть наличие высшей гармоники обусловлено конструктивными особенностями упругого элемента, и не зависит от интенсивности импульсной нагрузки.

С достаточной степенью точности в качестве входных параметров анализируемой системы можно выделить диаметр мембраны d_m , массу волновода m_b , свойства рабочей жидкости и ее объем, наличие воздушной полости над жидкостью, а также W_0 . Как показано в работе [9], динамика pulsa-

ции парогозовой полости (ППП) можно определить с учетом вкладываемой в нее энергии, что сводится к зависимости от W_0 .

В работе [5] на основе численного моделирования выполнена оценка A_B (амплитуды затухающих колебаний торца волновода ЭРГУК) на послеразрядной стадии. Показана возможность управления параметрами нагружения жидкого металла при ЭГИО за счет геометрических характеристик ЭРГУК. Расчеты выполнены при значениях запасенной энергии 1; 2 и 3 кДж. Численный эксперимент показал, что с увеличением δ_m и d_b в 2 раза A_B уменьшается почти на порядок, проявляются высокочастотные составляющие в основном перемещении мембраны, а частота затухающих колебаний увеличивается. При увеличении d_m и соответственно диаметра камеры A_B существенно повышается, длительность основного перемещения не изменяется, а частота затухающих колебаний значительно падает. Увеличение d_b , а значит, и m_b несколько снижает A_B и частоту затухающих колебаний. Графические зависимости максимальной амплитуды колебаний торца волновода A_a^{\max} от δ_m при фиксированных значениях d_m и W_0 представлены на рис. 3. Из приведенных графиков видно, что с изменением W_0 амплитуда устанавливается приблизительно прямо пропорционально энергии разряда. Изменение же δ_m , например в 2 раза, приводит к изменению A_a^{\max} уже примерно от 7 до 9 раз, то есть почти на порядок. Таким образом, δ_m оказывает существенное влияние на стабилизацию этого выходного параметра по сравнению с W_0 .

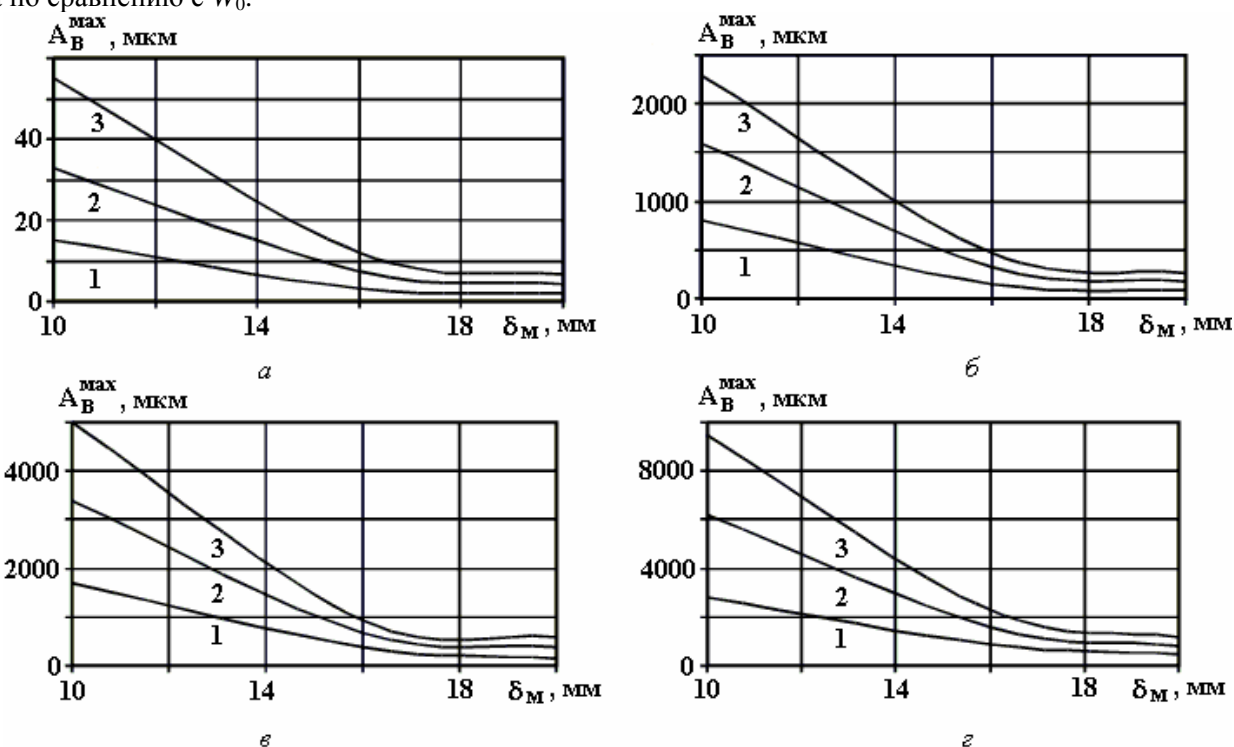


Рис. 3. Зависимость максимальной амплитуды колебаний торца волновода от толщины мембраны при диаметре мембраны d_m (в мм) 100 (а), 230 (б), 300 (в) и 400 (г): 1 – $W_0=1$ кДж; 2 – $W_0=2$ кДж; 3 – $W_0=3$ кДж

Следует отметить, что при увеличении δ_m более чем на 16 мм не происходит заметных изменений в значениях A_a^{\max} . Следовательно, верхний предел δ_m может быть ограничен этим значением, а нижний – величиной, при которой A_a^{\max} не выходит за область упругих деформаций.

В [3] приведены результаты экспериментальных исследований амплитудно-частотных характеристик ЭРГУК с цилиндрической камерой. Для диапазона δ_m от 3 до 16 мм вид зависимости максимального перемещения мембраны от δ_m при энергии в импульсе 312 Дж и при напряжении 50 кВ аналогичен кривым, приведенным на рис. 3. В этой же работе выполнен спектральный анализ перемещений мембраны ЭРГУК, который позволил определить спектр основных частот. Установлено, что с увеличением δ_m положение максимума спектра перемещается в сторону больших частот. При изменении остальных параметров ЭРГУК существенного изменения положения максимума спектра не наблюдается. Это подтверждает полученный в [5, 7] вывод о том, что высокочастотные колебания мембраны определяются ее толщиной.

Таким образом, параметры разрядной камеры можно выстроить в порядке наибольшего влияния на параметры нагружения расплава на стадии ПГП в следующей последовательности: δ_m , W_0 , d_m , d_b . Причем чем больше значение W_0 , тем более чувствительными являются ВСФП к изменению δ_m . Учитывая, что δ_m выбирается из соображений прочности мембраны, актуальной является задача по уточнению ее геометрии и динамики.

Влияние свойств рабочей жидкости разрядной камеры на параметры нагружения. В качестве рабочих жидкостей разрядных камер ЭРГУК применяется вода или слабые электролиты [3]. Характеристики свободного (не иницируемого проволочкой) разряда существенно зависят от физико-химических свойств рабочей среды, главным образом от удельного сопротивления ρ_c .

В [3] проведены сравнительные экспериментальные исследования влияния различных рабочих жидкостей на динамические характеристики передающего элемента ЭРГУК. Исследовались следующие жидкости: техническая вода ($\rho_c = 8,5$ Ом·м), дистиллированная ($\rho_c = 150\text{--}200$ Ом·м) и кремнийорганическая (полиметилсилоксановая) жидкость ПМС-40. Энергия в импульсе изменялась от 50 до 750 Дж. Показано, что при использовании дистиллированной воды в качестве рабочей среды величина ускорения эластично-упругого элемента ЭРГУК изменяется от 3000 до 11000 м/с² при W_0 , равной 80 и 720 Дж соответственно. При этом скорость перемещения изменяется от 0,3 до 2,5 м/с, перемещение составляет 200–800 мкм, а основными являются гармоники с частотой 1,25 кГц. При использовании технической воды наблюдается снижение параметров колебаний передающего элемента ЭРГУК. Максимальное ускорение составляет 10000 м/с², скорость не превышает 1,6 м/с, а перемещение – 600 мкм. Основные гармоники имеют частоту 1,5 кГц. Значительно уменьшаются значения параметров ЭРГУК в случае применения жидкости ПМС-40. Так, величина ускорения находится в пределах от 1500 до 3000 м/с² при W_0 , равной 80 и 320 Дж соответственно. Скорость перемещения элемента составила 0,6 м/с, а максимальное перемещение изменялось от 50 до 150 мкм. При всех параметрах разряда установлено, что основные гармоники колебаний ЭРГУК имеют частоту 1,75 кГц.

Следовательно, применением ПМС-40 в качестве рабочей жидкости удастся понизить ускорение на внешней поверхности эластично-упругого элемента по сравнению с технической водой в 1,25–2,25 раза, а с дистиллированной – в 2,3–3,5 раза. При этом энергетические характеристики спектра колебаний выше, чем для дистиллированной воды, но несколько ниже, чем для технической. В то же время авторы отмечают значительное повышение стабильности работы ЭРГУК.

Таким образом, выходные характеристики установки в значительной мере зависят от свойств рабочей жидкости, и путем соответствующего ее подбора можно стабилизировать в заданном диапазоне параметры нагружения при ЭГИО расплава в ковше. Наиболее целесообразно использовать в разрядных камерах воды с ρ_c в пределах 20 Ом·м [9]. Это дает удовлетворительные показатели стабильности и эффективности разряда, технически просто реализуется, а также экономически выгодно.

Влияние объема воздушной полости в верхней части разрядной камеры и прокачки рабочей жидкости через межэлектродный промежуток на параметры нагружения. В работе [10] проведены теоретические и экспериментальные исследования степени влияния объемного содержания воздуха вверху разрядной камеры и прокачки воды через камеру на амплитуду колебаний волновода A_b . Установлено, что наличие воздушной полости и прокачки жидкости положительно влияет на увеличение A_b , так как правильно организованная прокачка стабилизирует разряд и минимизирует потери на пробой, что можно отнести к категории иницирования разряда, а воздушная полость является резонатором процессов динамики ПГП в закрытом объеме [9]. На базе численного моделирования процессов, происходящих в разрядной камере с учетом принятых допущений, выявлено, что наличие воздушной полости объемом 0,5% от объема разрядной камеры приводит к значительному росту максимального размаха колебаний волновода, но в общем изменения размаха имеют статистический характер. Выбор объемного содержания воздуха позволит регулировать (в необходимых пределах) величину и характер передаваемой нагрузки на объект обработки на стадии передела в зависимости от заданных служебных свойств отливок. Используемые в ЭРГУК для ЭГИО расплава жидкости должны прокачиваться, чтобы обеспечить охлаждение рабочей камеры. Эта мера вызвана высокими температурами жидкого металла, теп-

ло от которого передается по волноводу в разрядную камеру. Поэтому системы и принципы прокачки более чем сама жидкость влияют на ВСФП.

В ИИПТ НАН Украины проведены экспериментальные исследования разрядного тока и напряжения для разных l_p как при прокачке межэлектродного промежутка, так и без нее [11]. Определялись предпробивные потери W_0 для различных значений U_0 , диаметра стержня электрода и l_p . Применялись три схемы прокачки межэлектродного промежутка: через полый электрод; полый токовод; через полый изолятор. Как показали результаты исследований, наиболее удачной и рекомендованной к дальнейшей эксплуатации является конструкция электрода с прокачкой через полый изолятор. При такой схеме предпробивные потери снижаются в среднем в 1,3–2,5 раза по сравнению с тем же электродом, но без прокачки, в результате чего появляется возможность увеличить диаметр стержня электрода до 12–15 мм, следовательно, в 2–3 раза увеличить ресурс его работы. С увеличением диаметра стержня скорость прокачки межэлектродного промежутка возрастает. Так, например, с увеличением диаметра от 8 до 15 мм эффективную скорость прокачки необходимо повысить от 3 до 5 м/с. Дальнейшее увеличение скорости снижает эффективность работы электрода. Кроме того, длина разрядного промежутка l_p для предпробивных потерь, составляющих 20–30 % от W_0 , при прокачке на 30–40 % больше, чем без нее, то есть появляется возможность выведения изолятора электрода из зоны разрушения, что также увеличивает ресурс работы технологической установки.

Следовательно, стабилизировать параметры нагружения объекта обработки можно за счет оптимального подбора $V_{ВП}$ в верхней части камеры, а также прокачкой с определенной скоростью жидкости через межэлектродный промежуток.

Выводы

1. Проведенный анализ подтвердил ранее полученные данные о многофакторном и неоднородном влиянии параметров разрядного контура и параметров ЭРГУК на ВСФП, определяющие процессы в расплаве.

2. Предложен системный подход к определению показателей стабильности и эффективности ВСФП, что дает возможность комплексного многофакторного управления ВСКИ в расплаве.

3. На канальной стадии ВСФП наиболее чувствительны к радиусу волновода и величине напряжения пробоя U_p , причем если радиус волновода можно зафиксировать, то влияние U_p носит статистический характер.

4. Минимизировать разброс ВСФП можно рациональной системой прокачки жидкости в разрядной камере. Прокачка с определенной скоростью (в зависимости от диаметра стержня электрода) жидкости через межэлектродный промежуток позволяет снизить предпробивные потери и повысить ресурс работы технологической установки.

5. ВСФП на стадии ППП наиболее чувствительны к толщине мембраны ЭРГУК и объему воздушной полости над жидкостью. Толщина мембраны оказывает существенное влияние на стабилизацию амплитуды колебаний волновода по сравнению с энергией разряда W_0 . Влияние воздушной полости на динамику торца волновода имеет статистический характер, причем максимальный эффект достигается при незначительном изменении объема воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Найдек В.Л.* Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового назначения // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. Киев: Наукова думка, 1998. С. 133–154.
2. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
3. *Поздеев В.А., Царенко П.И., Бутаков Б.И., Малюшевский П.П.* Электроразрядные генераторы упругих колебаний. Киев: Наукова думка, 1985. 176 с.
4. *Галиев Ш.У., Барбашова Г.А., Билянский Ю.С., Журнов М.В., Косенков В.М.* Взаимодействие электроразрядного генератора колебаний с жидким металлом в ковше // Проблемы прочности. 1991. № 11. С. 78–82.
5. *Цуркин В.Н., Мельник А.В.* Влияние геометрических характеристик электроразрядного генератора упругих колебаний на перемещение рабочего элемента на послеразрядной стадии // Электронная обработка материалов. 2006. № 1 (237). С. 63–69.

6. Коробов В.А., Цуркин В.Н. Метод исследования динамических характеристик электроразрядного вибратора // Электронная обработка материалов. 2002. № 1. С.86–88.
7. Литвиненко В.П., Коваль С.В., Сысоев В.Г. Исследование заземленного упругого элемента при импульсном нагружении // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости: Сб.науч.тр. Киев: Наукова думка, 1980. С. 173–183.
8. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. Расчетная методика для определения влияния параметров разряда на характеристики акустического поля в расплаве при электрогидроимпульсной обработке // Электронная обработка материалов. 2004. № 1. С. 82–87.
9. Гулый Г.А., Малюшевский П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев: Наукова думка, 1977. 176 с.
10. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний // Электронная обработка материалов. 2003. № 6.С. 63–69.
11. Экспериментальный поиск путей инициирования разряда принудительной прокачкой рабочей жидкости через межэлектродный промежуток: Отчет о НИР /заключит // ИИПТ, НАН Украины; Руководитель В.А.Стрельцов. №ГР 0193U024940; Инв.№ 790-НС. Николаев, 1994. 49 с.

Поступила 23.11.06

Summary

Possibility to use the system analysis of factors which stabilize loading during the electrical hydro pulse treatment of melt is shown. The degree of their influence on the outward structure-formation parameters of the work instrument is revealed. The totality of general parameters of technological plant which ensures maximum effect of treatment stability is determined.
