
НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ

621.745.56:621.7.044.4

В. М. Грабовый, А. В. Иванов, А. В. Мельник

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ГЕНЕРАТОРА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Выполнена классификация электроразрядных генераторов упругих колебаний, используемых в технологии электрогидроимпульсной обработки жидкого металла, расходуемым волноводом. Методами численного и физического экспериментов определены приемы повышения эффективности электрогидроимпульсного воздействия на расплав без роста энергозатрат на обработку.

Ключевые слова: электрогидроимпульсная обработка, жидкий металл, волновод, электроразрядный генератор упругих колебаний.

Виконано класифікацію електророзрядних генераторів пружних коливань, які використовуються в технології електрогідроімпульсної обробки рідкого металу хвилеводом, що витрачається. Методами чисельного та фізичного експериментів визначені прийоми підвищення ефективності електрогідроімпульсної дії на розплав без зростання енерговитрат на обробку.

Ключові слова: електрогідроімпульсна обробка, рідкий метал, хвилевод, електророзрядний генератор пружних коливань.

Classification of elektrodischarge generators of elastic oscillations, used in technology of elektrohydropulse treatment of liquid metal by the expended waveguide is compiled. The methods to increase the efficiency of the elektrohydropulse effect on the melt without increased energy costs for the treatments are determined due to numerical and physical experiment.

Keywords: elektrohydropulse treatment, liquid metal, waveguide, elektrodischarge generator of elastic oscillations.

Введение

Сегодня ряд проблем качества литого металла решается путем активной электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) расплава металлов и сплавов [1-3] при использовании электрогидравлических модульных установок. Важнейшим звеном таких установок является электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК).

Выделение нерешенной части проблемы. Ударно-волновое воздействие при ЭГИО – это эффективный способ создания экстремальных состояний исходного вещества, в результате которого существенно изменяются структура и свойства расплава. Это обеспечивает получение новых свойств материалов в литом или

Новые методы и прогрессивные технологии литья

термически обработанном изделии [4-8]. Конечный результат ЭГИО в значительной степени определяется условиями протекания высоковольтного разряда в ЭРГУК, которые зависят от его конструкции [9]. Вместе с тем, считая с момента публикации обобщающей монографии, то есть с 1985 г. и до настоящего времени, материалов, характеризующих современный уровень разработок ЭРГУК, опубликовано мало. Целью работы является систематизация и описание конструктивных особенностей ЭРГУК и их взаимосвязь с эффективностью воздействия.

Общие положения. Принцип работы ЭРГУК основан на использовании эффектов, проявляющихся при высоковольтном электрическом разряде в воде. В общем случае ЭРГУК представляет собой разрядную камеру мембранного типа, заполненную рабочей жидкостью. Разрядная камера выполнена в виде толстостенного цилиндра с верхним жестким и нижним упругим основаниями. Между электродом, расположенным на оси камеры, и упругим основанием происходит электрический разряд. При этом в рабочей жидкости камеры возникает волна давления, которая деформирует нижнее основание. В свою очередь, нижнее основание передает энергию волноводу, погруженному в ковш с расплавом. Таким образом, возмущения от волновода генерируют в жидком металле нестационарное поле давлений, которое инициирует в расплаве физические процессы, оказывающие положительное воздействие на качество структуры отливок.

Результаты исследований и их обсуждение. Как показывает практический опыт применения ЭРГУК для обработки расплава [2, 9-12], основными факторами, влияющими на внешние, формирующие структуру, параметры, являются геометрические размеры, форма элементов разрядной камеры; характеристики разрядного контура; свойства рабочей жидкости, заполняющей разрядную камеру; система и режим прокачки жидкости в разрядной камере; наличие объема воздуха в верхней части разрядной камеры; наличие и конструкция упругой подвески. На рис. 1 представлен один из вариантов ЭРГУК.

На рис. 2 приведена классификация конструкций ЭРГУК.

В разработанных конструкциях основные геометрические размеры изменяются в следующих пределах: высота ЭРГУК – от 0,1 до 1,5 м; объем ЭРГУК – от 5 до 120 л; толщина мембраны – от 3 до 30 мм; диаметр мембраны – от 0,1 до 1,0 м; диаметр волновода – от 0,005 до 0,5 м.

В принятой классификации можно выделить множество более мелких признаков. Например, умеренная или интенсивная прокачка ЭРГУК может осуществляться и через положительный электрод. Исследованы конструкции с прокачкой через полый токовод электрода и с подачей воды через полость, образуемую тоководом и трубчатым элементом электрода. Такое конструктивное решение позволяет инициировать пробой разрядного промежутка в ЭРГУК и снизить предпробивные потери. Достаточно часто электрод снабжается сменным полиэтиленовым наконечником, причем конфигурация внутренней полости существенно зависит от параметров разрядного контура. Это конструктивное решение позволяет продлить срок службы

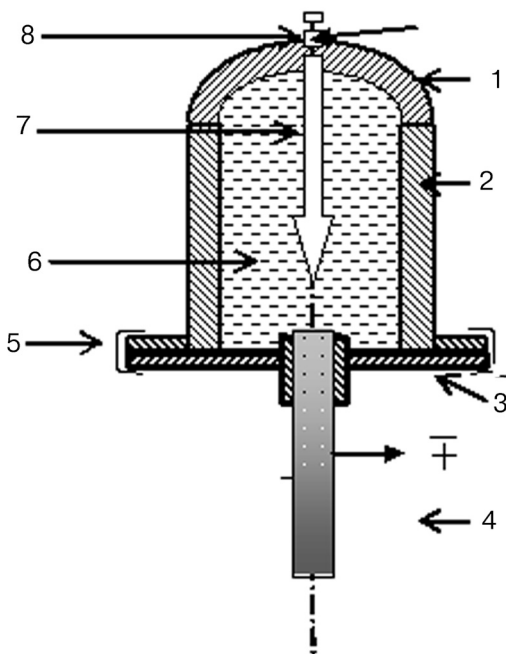


Рис. 1. Общий вид и классификация ЭРГУК: 1 – крышка; 2 – корпус; 3 – мембрана; 4 – волновод; 5 – кремальерное соединение; 6 – вода; 7 – токоподвод

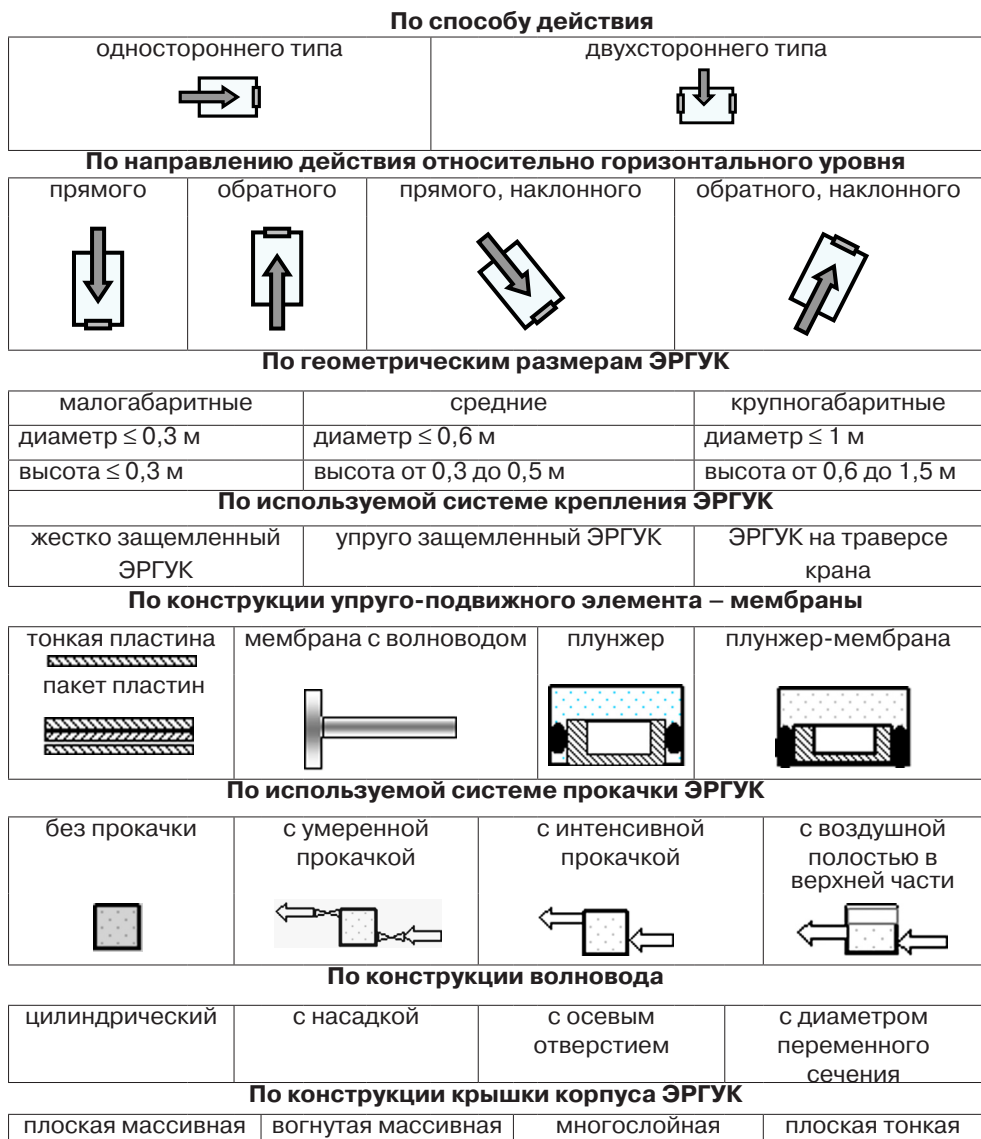


Рис. 2. Классификация ЭРГУК по элементарным признакам

электродной системы. Материалом изоляции электрода ЭРГУК тоже можно варьировать – полиэтилен высокого давления, вакуумная трубка, шнекованная резина и т. д. Эффективная реализация процесса ЭГИО с ЭРГУК зависит, кроме перечисленных выше характеристик, от параметров разрядного контура. На рис. 3 приведены варианты управления работой ЭРГУК. Рассмотрим их более детально.

Влияние объема воздушной полости в верхней части ЭРГУК прямого действия (дополнительная информация приведена в работе [10]). Эксперименты проводили при напряжении $U_0 = 50$ кВ; запасаемой энергии $W_0 = 1,25$ кДж; частоте следования разрядов – 1 Гц. Время работы ЭРГУК – 30 с, относительный объем воздушной полости составлял 17 % от объема рабочей полости ЭРГУК. Установлено, что пластическая деформация крешерного датчика, нагружаемого вдоль его оси, составила, в мм:

- с воздушной полостью и прокачкой воды – $\sim 2,5$;
- с воздушной полостью и без прокачки – ~ 2 ;
- без воздушной полости и с прокачкой – $\sim 1,5$;
- без воздушной полости и прокачки – ~ 1 .

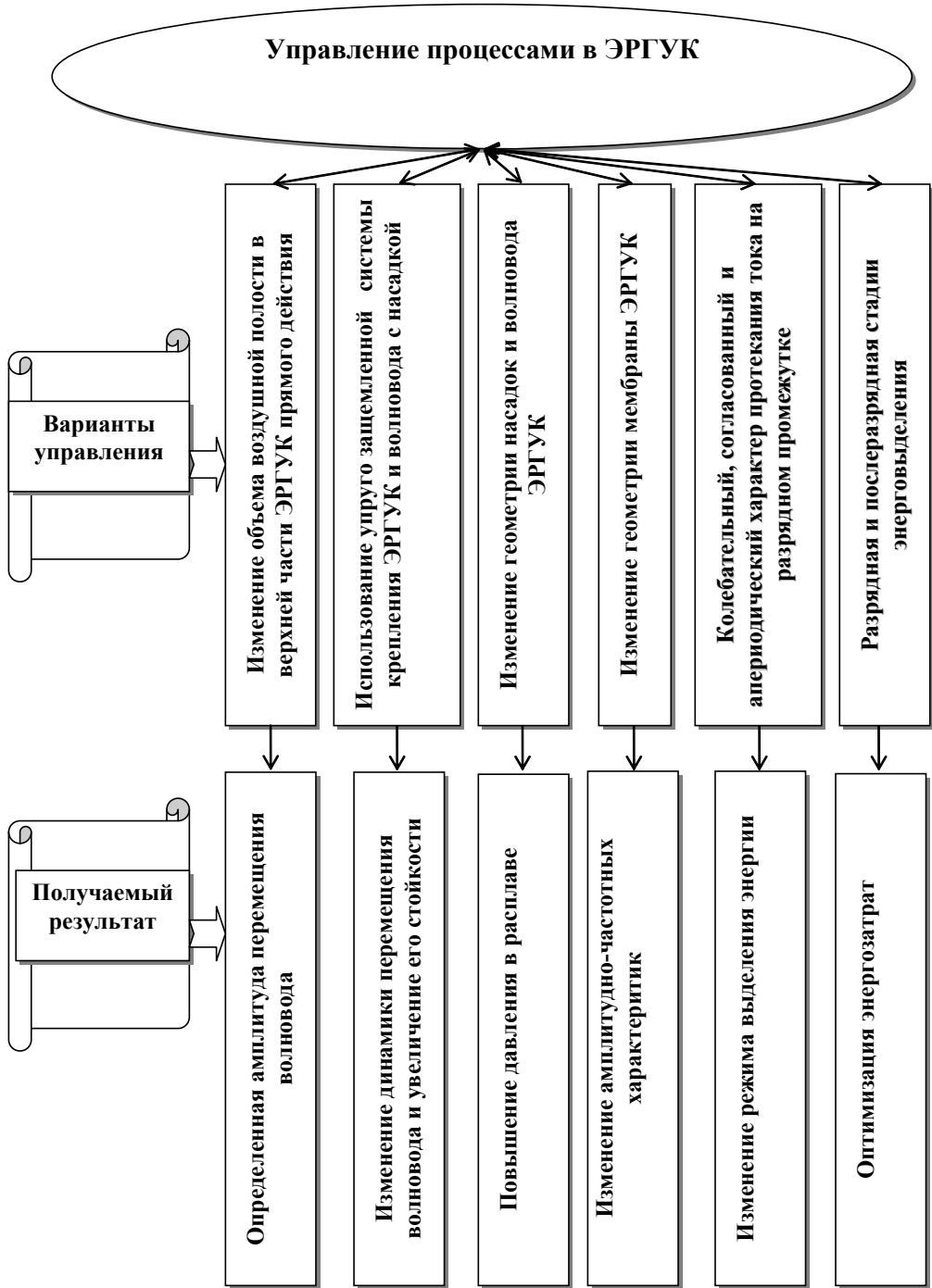


Рис. 3. Варианты управления работой ЭРГУК

Численным моделированием установлено, что наличие в верхней части ЭРГУК воздушной полости объемом от 1,5 до 6,0 % от объема разрядной камеры способствует максимальному повышению размаха колебаний ($A_{\max} - A_{\min}$) волновода ЭРГУК (от 1,0-1,5 до 2,0-2,5 мм), рис. 4, то есть очевидно, что наличие воздушной полости и прокачки жидкости положительно влияет на увеличение амплитуды перемещения торца волновода ЭРГУК. Установлены оптимальные значения этого параметра.

Использование упругой подвески ЭРГУК и насадки на волновод (дополнительная

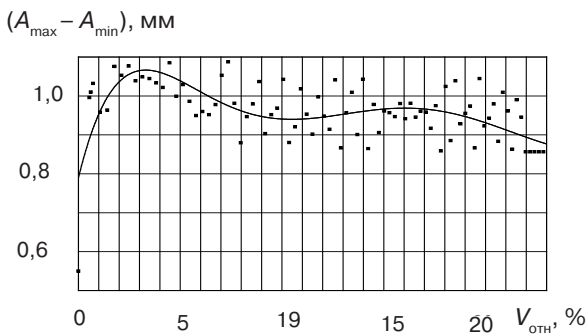


Рис. 4. Влияние относительного объема воздушной полости ($V_{отн}$) в верхней части ЭРГУК на размах колебаний торца волновода ($A_{max} - A_{min}$)

информация в работах [13-14]). На рис. 5 приведены результаты изменения амплитуды перемещения торца волновода ЭРГУК с упруго заземленной системой крепления (A_B – амплитуда перемещения торца волновода диаметром 20 мм; d_n – наружный диаметр насадки, $d_n = 50$ мм). В общем движение торца волновода представляет собой затухающие гармонические колебания, что объясняется синусоидальным законом изменения возмущающей силы $F(t)$. Наличие цилиндрических насадок

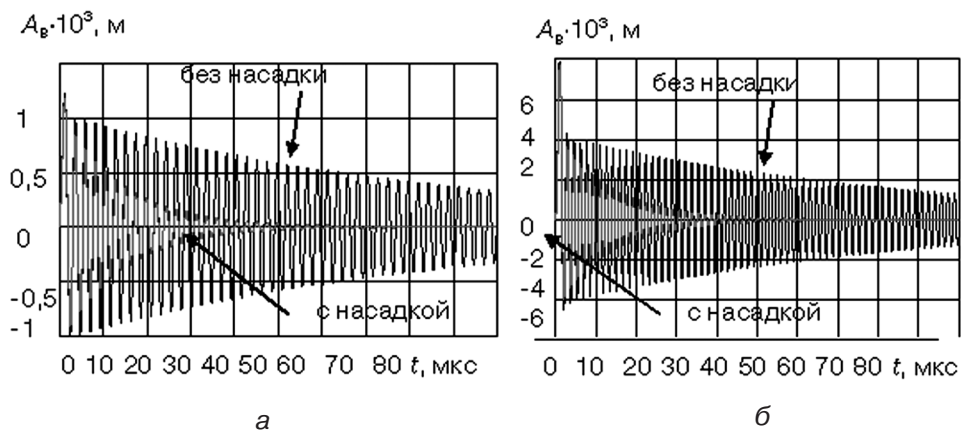


Рис. 5. Изменение амплитуды перемещения торца волновода ЭРГУК на упругих элементах: а – при $k_1/k_2 = 0,5$; б – при $k_1/k_2 = 1$ (k_1 – суммарный коэффициент жесткости пакетов упругих элементов, Н/м; k_2 – коэффициент жесткости мембраны, Н/м)

на торце волновода способствует более интенсивному затуханию колебаний. Чем больше диаметр насадки, тем быстрее система возвращается в положение статического равновесия.

Для расплава Al (при d_n , равном 30 мм) колебания затухают практически после 200 мс. С увеличением d_n до 70 мм колебания затухают после 40 мс, а амплитуда падает до нуля. Чем ближе значение отношения жесткости упругих элементов к жесткости мембраны, тем больше частота колебаний волновода, но величина амплитуды при этом значительно уменьшается. В этой связи рассмотрим роль диссипативных свойств колебательной системы – расплава алюминия и железа. В качестве ее характеристики используется логарифмический декремент колебаний, который равен натуральному логарифму отношения двух последовательных пиковых значений смещения, разделенных во времени одним периодом. С другой стороны, отношение рассеянной энергии за один цикл к средней энергии цикла характеризует быстроту затухания колебательного процесса и представляет собой коэффициент поглощения ψ , который при умеренном затухании вдвое больше логарифмического декремента [15]. Оценим значения ψ в предположении, что затухание колебаний волновода без насадки и с круговой насадкой при d_n , равном 30 мм, умеренное, то есть $\psi = const$ для всего процесса движения. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициента поглощения (ψ) при ЭГИО

ψ для расплава Al		ψ для расплава Fe	
без насадки	с насадкой $d_n = 30$ мм	без насадки	с насадкой $d_n = 30$ мм
0,112	0,268	0,325	0,75

Следует отметить, что увеличение коэффициента поглощения энергии за счет цилиндрических насадок для расплава алюминия и железа остается величиной постоянной – $2,85 \pm 0,05$. Демпфирующие свойства расплава определяются его плотностью, поэтому с ее повышением заметно падает амплитуда. Так, если для расплава алюминия при колебаниях волновода без насадки амплитуда падает до 1 мм через 110 мс, то для расплава железа это значение амплитуды наблюдается при 38 мс.

Влияние изменения геометрии волновода, насадок и мембраны ЭРГУК (дополнительная информация в работах [14, 16]). Численный эксперимент показал, что с увеличением толщины мембраны (в 2 раза) и диаметра волновода амплитуда уменьшается почти на порядок, появляются высокочастотные составляющие, в основном перемещение мембраны, а частота затухающих колебаний увеличивается в 2,8 раза. С повышением запасаемой энергии амплитуда торца волновода и длительность основного перемещения увеличиваются, частота затухающих колебаний практически не изменяется. При увеличении диаметра мембраны в 4 раза амплитуда колебаний волновода повышается на два порядка, сокращается длительность основного перемещения и значительно (на 70 %) падает частота затухающих колебаний. Увеличение диаметра волновода несколько снижает амплитуду основного перемещения и частоту затухающих колебаний. Увеличение диаметра волновода в 2 раза в 1,25 раза снижает амплитуду основного перемещения и в 1,5 раза – частоту затухающих колебаний.

Воздействие на расплав происходит как на разрядной, так и послеразрядной стадиях обработки. Перемещение рабочего элемента ЭРГУК представляет собой результирующее движение от воздействия давления канала разряда и квазистатического давления парогазовой полости (ПГП). Численным моделированием установлено, что амплитуды первого полупериода колебаний торца волновода на разрядной и послеразрядной стадиях практически идентичны. На послеразрядной стадии в расплав вводятся достаточно высокие уровни давлений (до 33 МПа), но в более узком частотном диапазоне (до 600 Гц), чем на стадии энерговыделения (давление – до 1 МПа, частотный диапазон – от 0 до 100 кГц).

Влияние колебательного, согласованного и аperiodического разрядов на характер протекания тока на разрядном промежутке (дополнительная информация в работе [17]). Как известно [18], при ЭГИО в межэлектродном промежутке ЭРГУК происходит электровзрывное преобразование энергии, формируется парогазовая полость – источник силового воздействия на расплав. Динамика процесса претерпевает три последовательные стадии, рис. 6.

Первая стадия – формирование токопроводящего канала, замыкающего межэлектродный промежуток. Вторая, канальная стадия, начинается с момента замыкания водного промежутка каналом высокой проводимости и характеризуется быстрым выделением в канале электрической энергии, резким расширением разрядного промежутка, формированием и распространением импульсов сжатия, которые передаются в расплав через волноводную систему. Заключительная, послеразрядная стадия, наступает после окончания выделения энергии в разрядном канале и характеризуется пульсацией послеразрядной парогазовой полости, которая является вторичным источником возмущений в расплаве.

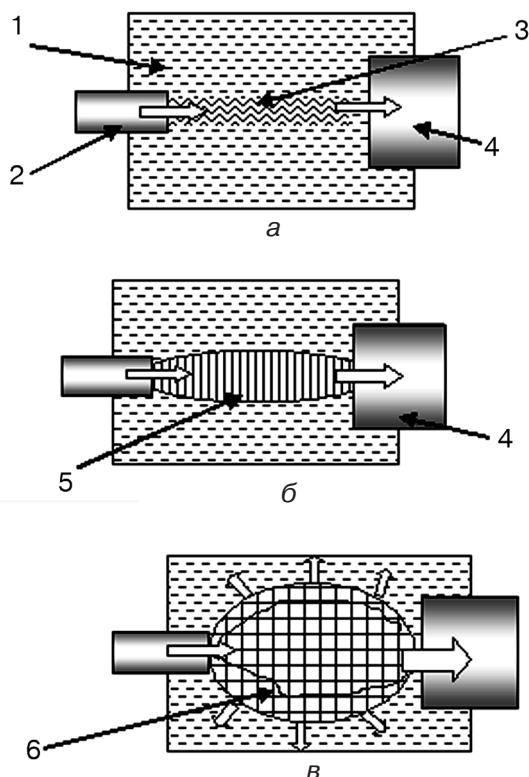


Рис. 6. Геометрическая модель процесса разряда: *а* – взаимнообменный способ передачи (нет прямого контакта), *б* – последовательный способ, *в* – параллельный способ; 1 – рабочая жидкость, 2 – оголенная часть электрода-анода, 3 – лидеры, 4 – волновод, 5 – канал разряда, 6 – пульсирующая парогазовая полость

воздушная полость в верхней части ЭРГУК.

Анализ результатов по изменению сопротивления канала разряда во времени позволил многообразие кривых тока $i(t)$, зависящих от C (емкости), U_0 (начального напряжения), L (индуктивности), l_p (разрядного промежутка), R_0 (начального радиуса канала) и скорости расширения канала, свести к семейству кривых, зависящих от трех комбинаций в безразмерном виде [19, 20]

$$\Pi_K = \eta^3 / \pi^2 = \frac{A \cdot l_p^2}{U_0^2 \sqrt{LC}}, \quad (1)$$

где A – искровая постоянная, равная $10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$.

Параметр η – доля энергии, выделившейся в течение первого полупериода разрядного тока, который равен нулю при коротком замыкании межэлектродного промежутка и единице при предельном аperiодическом разряде. Выделение электрической энергии при $\eta \approx 0,8$ соответствует так называемому согласованному режиму разряда, когда сопротивление канала становится равным волновому сопротивлению цепи [8]. Такой разряд является оптимальным по электрическому КПД и именно на его реализацию обычно направлено конструктивное исполнение ЭРГУК. Между тем расчеты, изложенные в работе [12], свидетельствуют, что более

Силовое воздействие на расплав непосредственно осуществляется на второй и третьей стадиях разряда, а процессы на первой стадии определяют степень потерь при формировании токопроводящего канала. Для повышения эффективности на первой стадии очень важно минимизировать энергетические потери, например, путем инициирования разряда струей воды, прокачиваемой через электрод. Результаты исследований [9] дают более широкое представление о проверенных на практике рекомендациях по конструктивному исполнению электродной системы, обеспечивающей минимизацию предпробивных потерь. Вторая, канальная стадия, является нелинейным, неуправляемым элементом системы электровзрывного преобразования энергии в ЭРГУК. Третья, послеразрядная стадия, является наиболее сложной для анализа, так как здесь силовое воздействие на расплав определяется не только энергией пульсирующей парогазовой полости, но также геометрией разрядной камеры и мембраны. Кроме того, на характер нагружения расплава, как показано ранее в работах [10, 11], может существенно влиять

предпочтительным для практического использования является колебательный режим разряда, соответствующий $\eta < 0,8$. При колебательном разряде в расплаве обеспечиваются максимальные давления и ширина акустического спектра, которые оказывают наибольшее силовое воздействие на различные структурные уровни в металле. Изменение энергетических характеристик канала разряда приведено на рис. 7 [12, 17]. При увеличении рабочего промежутка в ЭРГУК от 20 до 50 мм параметр η увеличивается на величину от 0,55 до 0,75. Потери на пробой изменяются от 0,25 до 0,65 кДж.

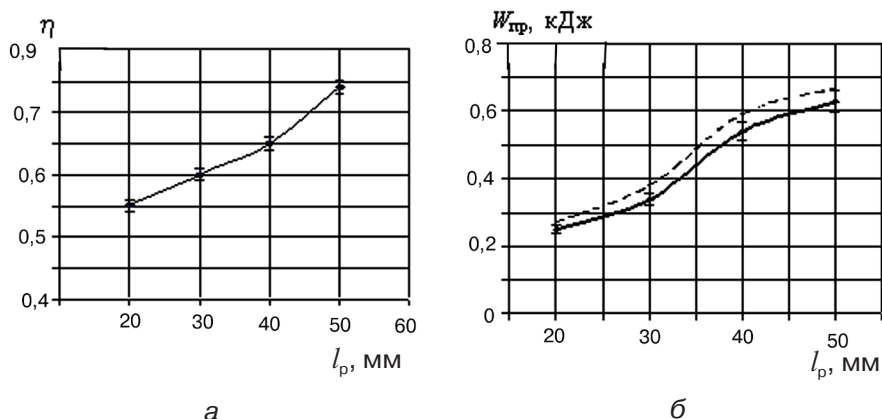


Рис. 7. Энергетические характеристики канала разряда: а – доля энергии, выделившейся в первом полупериоде разрядного тока; б – потери на пробой (— – эксперимент, --- – расчет по [21])

Авторами работы [12] получены соотношения давления на торце волновода $P_B(t)$ при трех режимах выделения энергии ($\eta_0 = 1$; $\eta_0 = 0,8$; $\eta_0 = 0,37$), соответствующих аperiodическому, согласованному (оптимальному с точки зрения электрического КПД) и колебательному характеру протекания тока на межэлектродном промежутке (l_p). Они показывают, что анализировать $P_B(t)$ нужно не только в зависимости от U_0 , C , L (индуктивность), l_p , но и от радиуса волновода (r). Причем, изменение давления на торце волновода наиболее чувствительно к изменению r . Максимальные же значения P_B^{\max} приобретаются при $\eta_0 = 0,37$, что указывает на то, что согласованный режим разряда не является оптимальным с точки зрения получения максимальных нагружающих факторов в расплаве. Исходя из этого можно выстроить входные параметры ЭРГУК в порядке их влияния на параметры нагружения расплава от большего к меньшему: r , U_0 , C , L независимо от l_p .

Результаты экспериментов. В качестве объекта обработки использовался литейный алюминиевый сплав АК5М2 группы “алюминий - кремний - медь”. В соответствии с ДСТУ 2839-94 он содержит, в %: от 0,2 до 0,8 Mg, от 4 до 6 Si, от 0,2 до 0,8 Mn, от 1,5 до 3,5 Cu, от 0,05 до 0,2 % Ti, не более 0,5 Ni, не более 1,5 Zn. Упрочняющей фазой являются дисперсные вторичные выделения $CuAl_2$. Приготовление сплава осуществлялось в несколько этапов. Сертификатная шихта переплавлялась в лабораторной термической печи модели СНОЛ-1,6.2,5 1/9-45 1P20 № 00177, (ТУ16-681051-84, 3,0 кВт, до 1100 °С). Заготовка помещалась в ковш (2 кг металла), который устанавливался в печь, нагретую до 780 °С. После расплавления металл переливался в два ковша – № 1 и 2 (уровень заполнения – 10 мм от верхней грани ковша). Ковши № 1 и 2 помещались в лабораторную термическую печь и выстаивались в ней до достижения температуры 780 °С и устранения неравномерности нагрева. Использовалась печь марки СНОЛ – 1,6.2,5 1/11-45, заводской № 001177,

снабженная регулятором температуры Ш4541 гр. ХА с диапазоном измерений температуры от 0 до 1100 °С. Неравномерность температуры по сечению печи (± 10 °С) устранялась путем выдержки металла в печи после срабатывания автоматического регулятора температуры (диапазон ожидаемых температур – от 600 до 800 °С). Затем ковши №1 и 2 извлекались из печи. Ковш с исходным металлом (№ 1) устанавливался на эстакаду, в него погружалась хромель-алюмелевая термопара и с помощью термоэлектрического преобразователя марки М890G производился замер температуры расплава. Ковш № 2 после замера и достижения температуры разлива подавался к лабораторному ЭРГУК и расплав в нем обрабатывался в течение 60 с методом погружения волновода лабораторного ЭРГУК на глубину, равную 1/3 от уровня металла в ковше. Металл из ковшей №1 и 2 разливался в кокили. Затем из отливок изготавливались технологические пробы.

В табл. 2 приведены значения η_0 и I_p для используемых режимов ЭГИО. Индуктивность разрядного контура $L_0 = 10$ мкГн.

Таблица 2. Зависимость доли выделившейся энергии η_0 от разрядного промежутка I_p при $W_0 = 1,25$ кДж

η_0	$I_p, \text{ м}$		
	$U_0 = 50 \text{ кВ}; C = 1 \text{ мкФ};$	$U_0 = 35 \text{ кВ}; C = 2 \text{ мкФ};$	$U_0 = 20 \text{ кВ}; C = 6 \text{ мкФ};$
0	0	0	0
0,1	0,004	0,004	0,003
0,2	0,012	0,01	0,008
0,3	0,022	0,018	0,014
0,4	0,034	0,028	0,021
0,5	0,047	0,039	0,03
0,6	0,062	0,052	0,039
0,7	0,078	0,065	0,049
0,8	0,095	0,08	0,06
0,9	0,114	0,095	0,072
1	0,133	0,112	0,084

Варьируя величиной U_0 от 20 до 50 кВ и емкостью C от 6 до 1 мкФ при постоянной $W_0 = 1,25$ кДж, прямым экспериментом установлено, что при $U_0 = 30$ кВ потери могут достигать 84 % от запасаемой энергии, время разряда возрастает до 400 мкс, а предпробойная стадия – до 300 мкс, что делает разряд неэффективным с энергетической точки зрения. Начиная с 35 кВ, наблюдается стабильный разряд и потери на пробой существенно сокращаются. При использовании режима с $U_0 \geq 50$ кВ предпробойные потери сводятся к минимуму. Это обеспечивает наибольшее удельное значение тока и максимальное силовое воздействие на расплав. Кроме того, установлено изменение темпа охлаждения для исходного и опытного металла (при U_0 , равном 20, 35 и 50 кВ соответственно) на стадии, предшествующей температуре ликвидуса. Приведенные данные свидетельствуют о существенном изменении состояния расплава после его ЭГИО. Эти изменения проявляются и в литом металле. Макрозерно в опытном литом металле существенно мельче, чем в образце из исходного металла. Следует отметить уменьшение размеров пор от 0,15 до 0,10 мм и объема пористости от 3,5 (исходный металл) до 2,3 %. Зона столбчатых кристаллитов во всех опытных образцах уже, чем в исходном. Величина микро-

зерна уменьшается от 104 (в исходном металле) до 98 мкм – в опытном, $U_0 = 50$ кВ, $C = 1$ мкФ. Прочность увеличивается от 180 до 188 МПа соответственно. Лучшее сочетание параметров структуры и механических характеристик достигается при емкости 1 мкФ и запасаемом напряжении 50 кВ. Причем, в этом случае присутствуют два механизма упрочнения литого металла – зернограничное и внутризеренное.

При варьировании величины разрядного промежутка l_p от 10 до 30 мм (при постоянной энергии $W_0 = 1,25$ кДж, $t_{\text{ЭГИО}} = 60$ с и $C = 1$ мкФ) было подтверждено существенное влияние доли, выделившейся в первый полупериод разрядного тока энергии – η . Максимальный эффект измельчения на макроуровне получен при $l_p = 30$ мм ($\eta_0 = 0,55$). По величине макрозерна он составил 75 % от уровня исходного литого металла (измельчение от 4,4 до 1,7 мм). Прочность металла увеличилась от 180 до 215 МПа при неизменной пластичности. В металле, полученном при ЭГИО расплава с колебательным режимом разряда при $l_p = 20$ мм ($\eta_0 = 0,4$), прочность возросла на 4 %, а пластичность – в 2,5 раза. Изменяя l_p при постоянной запасаемой энергии, можно получить различные механизмы формирования структуры литого металла, например, только зернограничное упрочнение ($l_p = 30$ мм, $\eta_0 = 0,55$) в сплаве АК5М2, или его сочетание с внутризерненным ($l_p = 20$ мм). Микрозерно уменьшилось от 104 (исходный металл) до 98 мкм (опытный, $l_p = 20$ мм). Фотографии микроструктуры образцов исследованного сплава приведены на рис. 8. Следует отметить, что при этом режиме достигнуто одновременное увеличение прочности до 188 МПа и пластичности до 2,5 %.

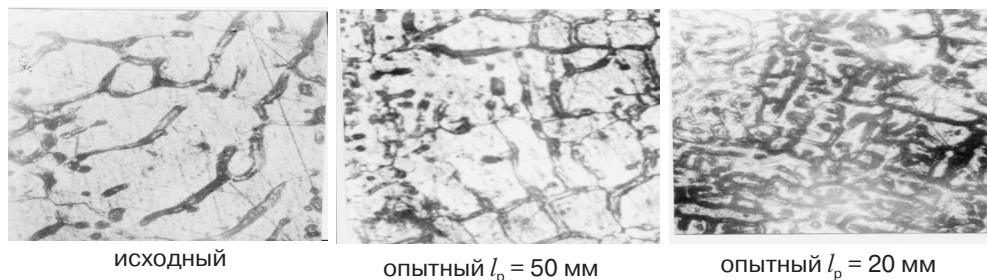


Рис. 8. Микроструктура образцов исследуемого сплава, $\times 250$

Таким образом, экспериментально подтвержден тезис, выдвинутый ранее, о ведущей роли колебательного характера протекания тока. Энергосиловой фактор внешнего воздействия характеризуется влиянием энергетических параметров – запасаемой энергии $W_0 = (0,5 \cdot C \cdot U_0^2)$ и интенсивностью воздействия, регулируемой частотой посылок импульсов давления (f) за время обработки ($t_{\text{ЭГИО}}$), а также геометрическим параметром – величиной разрядного промежутка (l_p), от которой зависит доля энергии, выделившейся в первый полупериод тока.

Выводы

На основе результатов численного моделирования и прямого эксперимента выполнены систематизация и описание конструктивных особенностей ЭРГУК, а также определена их взаимосвязь с эффективностью воздействия. Получены рекомендации по оптимизации параметров воздействия и геометрических характеристик элементов ЭРГУК, определяющие эффективность действия ЭГИО расплава на структуру и свойства литого металла. Исследован диапазон колебательного разряда от $\eta = 0,3$ до $\eta = 0,55$, определяемый величиной разрядного промежутка в ЭРГУК, и установлены варианты управления работой ЭРГУК.



Список литературы

1. Волков Г. В., Грабовый В. М., Синчук А. В. Обработка чугуна концентрированными потоками энергии // Литейн. пр-во. – 1998. – № 1. – С. 12-14.
2. Грабовый В. М. Наукові і технологічні основи електрогідроімпульсної дії на структуру і властивості виливків із сплавів на основі заліза і алюмінію: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2007. – 42 с.
3. Волков Г. В. Особенности морфологии интерметаллидных включений в жидком алюминиевом сплаве при обработке акустическим полем // Процессы литья. – 2006. – № 3. – С. 8-12.
4. Волков Г. В., Синчук А. В. Получение немагнитных чугунов с использованием акустической обработки // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 4-6.
5. Волков Г. В. Модификующий эффект ЕГЮ розплаву. Спеціальні сплави систем Fe-Cr-C, Fe-Ni-C, Fe-Si-C. Повідомлення 2 // MOM. – 2003. – № 3. – С. 48-55.
6. Цуркін В. М., Волков Г. В., Синчук А. В. Вплив електрогідроімпульсної обробки розплаву на елементи різних структурних рівнів в металі // MOM. – 2004. – № 4. – С. 10-14.
7. Электрогидроимпульсная обработка судостроительных сталей 25Л и 08ГДНФЛ / В. Н. Цуркин, В. М. Грабовый, А. В. Синчук, Н. А. Федченко // Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства. – Севастополь: УМИ, 2008. – С. 92-99.
8. Грабовый В. М. Выбор технологии электрогидроимпульсной подготовки расплава к заливке // Металлургия машиностроения. – 2009. – № 1. – С. 29-34.
9. Электроразрядные генераторы упругих колебаний / В. А. Поздеев, П. И. Царенко, Б.И. Бутаков, П. П. Малюшевский. – Киев: Наук. думка, 1985. – 176 с.
10. Цуркин В. Н., Мельник А. В. Влияние объема воздушной полости на закон перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний // Импульсные процессы в механике сплошных сред: Материалы XI Международной научной школы-семинара (август 2003). – Николаев: Атолл, 2003. – С. 30-31.
11. Цуркин В. Н., Мельник А. В. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний // Электронная обработка материалов. – 2003. – № 6 (224). – С. 63-69.
12. 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 // ЭОМ. – 2004. – № 1. – С. 82-87.
13. Цуркин В. Н., Мельник А. В. Процессы и характер нагружения расплава электроразрядным генератором колебаний на упругих элементах // Электронная обработка материалов. – 2009. – № 5 (259). – С. 91-96.
14. Мельник А. В. Гидродинамические процессы в расплаве, подвергнутом электрогидроимпульсной обработке с применением волноводных насадок // Науковий потенціал вищої школи: Тез. докл. – Миколаїв: КП Миколаївська обласна друкарня, 2009. – С. 22-25.
15. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
16. Цуркин В. Н., Мельник А. В. Влияние характеристик ЭРГУК на стабилизацию параметров нагружения расплава при электрогидроимпульсной обработке // Импульсные процессы в механике сплошных сред. – Николаев: КП Миколаївська обласна друкарня, 2007. – С. 138-140.
17. О выборе режима электрического разряда для ЭГИО расплава / В. Н. Цуркин, А. В. Синчук, А. В. Иванов, Ю. Н. Дегтев // ЭОМ. – 2007. – № 5. – С. 61-66.
18. Гулый Г. А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. – Киев: Наук. думка, 1990. – 208 с.
19. Кривицкий Е. В., Шамко В. В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – Киев: Наук. думка, 1979. – 207 с.
20. Кривицкий Е. В., Петриченко В. Н., Бондарец Л. М. Исследование энергетических характеристик предпробойной стадии подводного искрового разряда // ЖТФ. – 1977. – Т. 47, Вып. 2. – С. 319-325.
21. Окунь И. З. Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости. // Там же. – 1969. – Т. 39, Вып. 5. – С. 837-845.

Поступила 16.06.2010