

О ВЫБОРЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА

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

Среди многообразия развивающихся на сегодняшний день методов внепечной физико-технической обработки расплава метод электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) выгодно отличается низкими удельными энергозатратами, простотой встраивания в технологический процесс производства отливок, возможностью обрабатывать большие промышленные объемы расплава. Исследования, проведенные на черных и цветных металлах [1–3], свидетельствуют, что ЭГИО является относительно недорогим и эффективным инструментом повышения качества литой металлопродукции. Среди результатов, достигаемых за счет обработки, – дегазация и рафинирование расплава, гомогенизация в макрообъеме по температуре и химическому составу, активация потенциальных центров зародышеобразования, то есть целый комплекс явлений, которые в совокупности обеспечивают повышение качества закристаллизовавшегося металла.

По физической сущности ЭГИО – сложный метод обработки, включающий в себя элементы как ультразвукового, так и вибрационного воздействия на расплав. Здесь каждый из поступающих в расплав импульсов давления можно представить двумя основными стадиями. На первой стадии в межэлектродном промежутке разрядной камеры возникает плазменный канал, давление которого через волноводно-излучательную систему поступает в расплав в виде поличастотного импульса в микросекундном диапазоне времен. На второй, послеразрядной стадии плазменный канал преобразуется в пульсирующую парогазовую полость, которая деформирует упругую мембрану (нижнюю стенку разрядной камеры), и давление за счет механического перемещения волновода также поступает в расплав, но за более длительный – миллисекундный отрезок времени. Тем самым в обрабатываемом расплаве формируется нестационарное поле давлений, дискретность возникновения которого определяется частотой следования разрядных импульсов f . В зависимости от технологических требований и возможностей оборудования величина f колеблется в пределах 1–20 Гц. Роль первой, разрядной стадии ЭГИО, как правило, сводится к созданию в расплаве акустической кавитации и акустических микротечений, а второй, послеразрядной стадии, – к развитию мощных гидродинамических потоков. Зачастую разделить вклад каждого из рассматриваемых процессов в отдельности на конечное состояние расплава не представляется возможным. Например, источником, стимулирующим переход растворенных в металле газов в пузырьки и последующее их всплытие, безусловно, является акустическая кавитация. Но на интенсивность газоудаления влияют и восходящие конвективные потоки, которыми образованные на первой стадии газовые пузырьки выносятся на поверхность расплава. С конвективными потоками до сих пор также связывались выравнивание температуры и равномерное распределение химических элементов по объему расплава. Однако ряд выполненных в последнее время работ [4, 5] показывает, что нельзя в этом плане недооценивать и явление кавитации, которое обеспечивает повышение однородности расплава на атомарном уровне.

Таким образом, взаимообусловленность процессов, протекающих на первой и второй стадиях ЭГИО, реализует функциональные возможности этого метода комплексно решать проблему повышения качества литого металла. С другой стороны, именно в силу двухстадийности метода до сих пор остается открытым вопрос, связанный с выбором оптимальных энергетических параметров обработки, в частности режимов электрического разряда, для удовлетворения триединого требования: эффективность обработки, оцениваемая качеством металла, – минимизация энергетических затрат – долговечность электродной системы.

Цель работы – показать влияние режима электрического разряда на характеристики силового нагружения расплава, осуществляемого на первой и второй стадиях ЭГИО, и показатели качества твердого металла.

Первая стадия. Как показано в [6], зависимости тока, сопротивления и давления в канале от управляемых параметров разрядной цепи (напряжения зарядки накопителя U_0 ; емкости накопителя C ; индуктивности контура L ; длины разрядного канала l_p) можно свести к семейству кривых, зависящих лишь от одной безразмерной комбинации:

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{\pi A l_p^2}{U_0^2 \sqrt{LC}}} \quad (1)$$

где A – искровая постоянная, значение которой при свободном разряде равно $10^5 \text{В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$. Величина η определяется долей энергии, выделившейся в первом полупериоде разрядного тока. При $\eta = \text{idem}$ безразмерные функции тока, сопротивления и давления плазменного канала соответственно равны в сходные моменты времени, то есть η является критерием подобия разрядных электрических и гидродинамических характеристик, по которому удобно классифицировать режимы подводного искрового разряда. Среди возможных режимов разряда, применимых к ЭГИО расплавов, – согласованный ($\eta = 0,79$), когда осциллограмма разрядного тока содержит одно или полтора колебания, и колебательный режим ($0 < \eta < 0,79$), близкий к режиму короткого замыкания. Апериодический разряд ($\eta > 0,79$), который соответствует пробоем больших межэлектродных промежутков с помощью иницирующего проводника, в электрогидроимпульсных устройствах не используется. Согласованному режиму разряда соответствуют равенство активного сопротивления плазменного канала волновому сопротивлению цепи и самый высокий электрический КПД. Как следует из (1), при постоянных параметрах разрядной цепи изменить режим выделения энергии в канале разряда можно по мере того, как увеличивается расстояние между электродами. С увеличением межэлектродного промежутка улучшаются условия работы электродной системы и уменьшается износ электродов. Поэтому в устройствах для ЭГИО до настоящего времени электродная система настраивалась на реализацию, как правило, согласованного режима.

На рис. 1 представлено оборудование для электрогидроимпульсной обработки расплава.

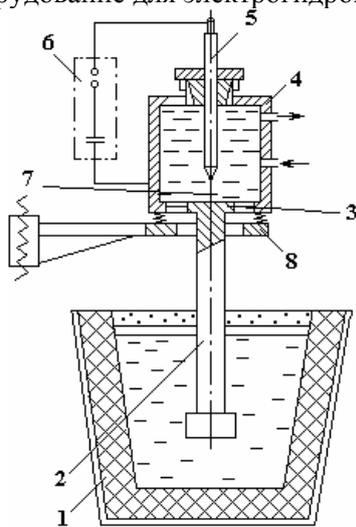


Рис. 1. Оборудование для ЭГИО расплава: 1 – расплав; 2 – волновод; 3 – мембрана; 4 – разрядная камера; 5 – электрод; 6 – генератор импульсных токов; 7 – межэлектродный промежуток; 8 – упругая подвеска

Ранее представлена расчетная методика [7], которая позволяет определить эффективное давление $P_B(t)$, возникающее на первой, разрядной стадии на торце волновода постоянного радиуса r_B , в зависимости от режима разряда при помощи следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} P_B(t) &= 19,44 \cdot \frac{U_0}{r_B^2} \cdot L^{-1,97} \cdot C^{-0,97} \cdot t^{3,44} \cdot \exp\left(-0,94 \cdot \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad \text{при } \eta = 0,37; \\ P_B(t) &= 3,1 \cdot \frac{U_0}{r_B^2} \cdot L^{-2,115} \cdot C^{-1,115} \cdot t^{3,74} \cdot \exp\left(-0,86 \cdot \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad \text{при } \eta = 0,79; \\ P_B(t) &= 0,73 \cdot \frac{U_0}{r_B^2} \cdot L^{-1,96} \cdot C^{-0,96} \cdot t^{3,42} \cdot \exp\left(-0,42 \cdot \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad \text{при } \eta = 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Графическое представление этих соотношений, приведенное на рис. 2,а, дает возможность видеть, что для фиксированных параметров разрядной цепи эффективное давление от согласованного режима разряда достаточно низкое и может не превышать кавитационную прочность металлической жидкости. Напомним, что согласно литературным источникам [8] порог кавитации, например, для алюминиевых расплавов составляет (0,65–1,3) МПа. Существенно более высокий уровень давления и самый широкий акустический спектр (рис. 2,б) достигается при колебательном режиме разряда, то есть при коротких межэлектродных промежутках. Таким образом, не согласованный, а колебательный режим разряда реализует на первой стадии обработки поступление в расплав более мощного полочастотного импульса давления, чем обеспечивается при одинаковых энергетических затратах развитие в обрабатываемой среде интенсивных кавитационных процессов, несмотря на очевидные преимущества согласованного режима по КПД.

Нетрудно показать, что амплитудное давление единичного разрядного импульса P_B^{\max} пропорционально запасенной энергии в импульсе W_0 :

$$P_B^{\max} \sim \kappa \cdot \sqrt{W_0}, \quad (3)$$

где κ – коэффициент, учитывающий характер разряда и площадь поперечного сечения волновода; $\kappa \approx 76,14$ для колебательного разряда и $\kappa \approx 26,79$ для согласованного. И, как следует из (3), чтобы увеличить давление в расплаве (например, для чистых металлов с высоким порогом кавитации), необходимо существенно повысить энергоемкость обработки. Между тем переход от согласованного к колебательному режиму разряда обеспечивает при тех же энергетических затратах, определяемых условием $W_0 = \text{const}$, практически 3-кратное повышение давления. Таким образом, расчеты показывают, что с точки зрения обеспечения в расплаве кавитационных процессов колебательный режим разряда представляется оптимальным.

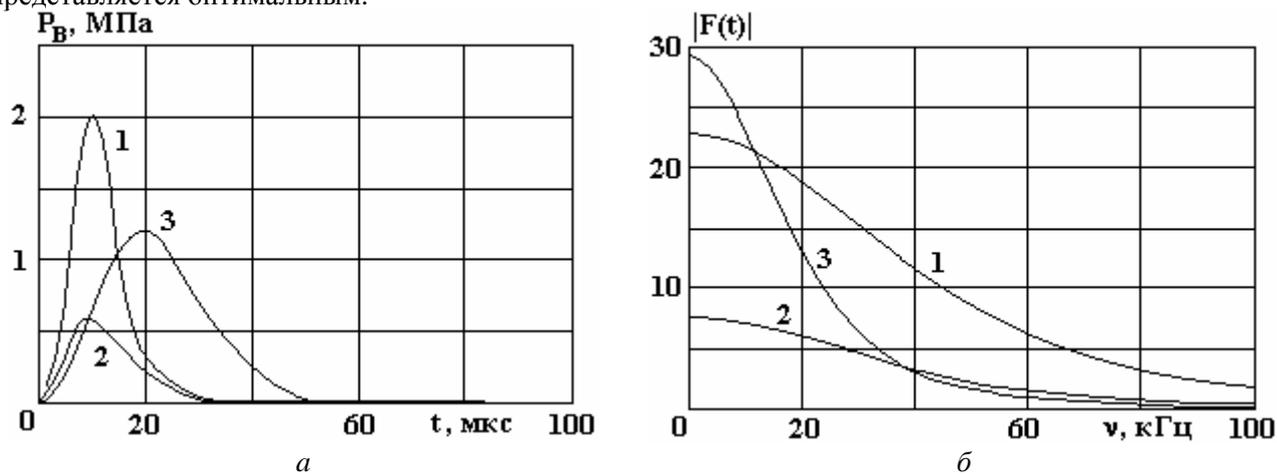


Рис. 2. Характеристики разрядного импульса:
а – давление на торце волновода; б – Фурье-спектр

Вторая стадия. В отличие от разрядной вторая, послеразрядная стадия, практически не поддается математическому описанию. Основной причиной здесь, на наш взгляд, является то, что поведение парогазовой полости в закрытом объеме, который представляет собой разрядная камера, существенно зависит от его геометрии. Это усложняет описание процесса нагружения упругой мембраны и предопределяет применение преимущественно экспериментальных методов изучения послеразрядных процессов. Анализируя влияние режима электрического разряда на характер пульсации парогазовой полости, можно полагать, что с переходом от согласованного на колебательный режим разряда давление, оказываемое полостью на упругую мембрану, будет уменьшаться. Это логично, так как с уменьшением межэлектродного промежутка уменьшаются объем парогазовой полости V_{\max} и ее потенциальная энергия E :

$$E = V_{\max} \cdot P_0, \quad (4)$$

где P_0 – гидростатическое давление в разрядной камере. Опыт показывает [9], что до 95% потенциальной энергии полости расходуется в течение первого цикла "расширение – сжатие", и при последующих пульсациях полость уже не имеет четкой геометрической формы и оказывает незначитель-

ное влияние на мембрану, которая в дальнейшем совершает свободные затухающие колебания. В силу этого экспериментально ударное воздействие парогазовой полости можно оценить по величине деформации крешерного датчика, образованной за счет первого смещения мембраны под действием вынуждающей силы.

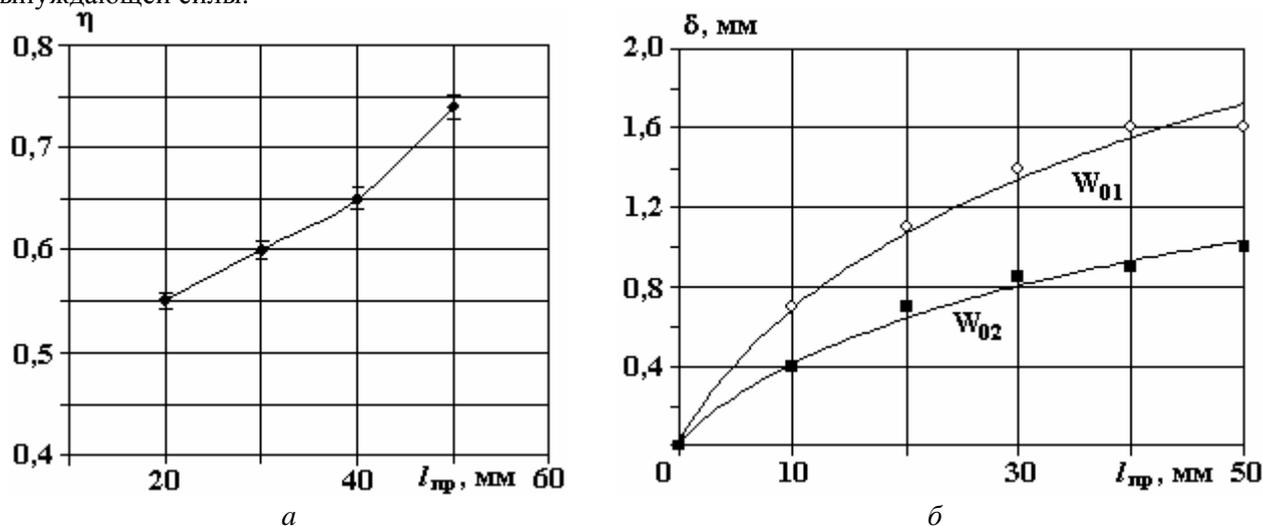


Рис. 3. Экспериментальные зависимости: а – доля энергии, выделившейся в первом полупериоде разрядного тока; б – абсолютная деформация крешерного датчика

Крешерные датчики из отожженной меди диаметром 15 мм и высотой 50 мм устанавливались между нижним торцом волновода и неподвижной платформой и тарировались единичными импульсами. Режим выделения энергии в канале разряда и значение η изменяли, варьируя длину межэлектродного промежутка $l_{пр}$ (рис. 3,а) при постоянных параметрах электрического контура и двух значениях запасаемой энергии в импульсе ($W_{01}=1,25$ кДж и $W_{02}=2,5$ кДж). В ходе эксперимента регистрировали осциллограммы разрядного тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$, после обработки которых определяли величину критерия η соотношением

$$\eta = \frac{\int_0^{\tau} I(t)U(t)dt}{W_0}, \quad (5)$$

где τ – длительность первой полуволны разрядного тока.

Кривые, представленные на рис. 3,б, дают возможность наблюдать влияние режима разряда на величину пластической деформации крешерного датчика, которая увеличивается с ростом W_0 , но, как и предполагалось, уменьшается по мере приближения режима разряда к колебательному. Для реальных процессов обработки это означает снижение интенсивности механического перемешивания расплава на второй, послеразрядной стадии.

Таким образом, простейшие оценки, выполненные в рамках разбиения единичного импульса на две стадии, показывают, что отсутствие на сегодняшний день четких рекомендаций по оптимальным режимам электрического разряда в устройствах для ЭГИО закономерно, поскольку один и тот же режим разряда оказывает взаимно противоположное влияние на процессы, протекающие в расплаве на первой и второй стадиях обработки. Качество твердого металла как интегральное свойство определяется совокупностью этих процессов, поэтому при выборе электроразрядного режима необходимо оговаривать, какие из показателей качества в конкретном случае являются приоритетными.

Структура и свойства металла. Влияние режима электрического разряда на структуру и свойства твердого металла изучали, обрабатывая двухкомпонентный алюминиевый сплав АЛ7. Переплав гарантированной шихты производили в муфельной печи при $T = 800$ °С. После расплавления и кратковременной выдержки металл доставали из печи, разливали на три ковша, один из которых, контрольный, отстаивался, а расплав в двух опытных ковшах подвергался ЭГИО при различных разрядных режимах. Обработку осуществляли в течение 40 с при частоте следования разрядов $f = 1,5$ Гц с запасаемой энергией $W_0 = 1,25$ кДж. Режим выделения энергии в канале разряда изменяли путем регулировки межэлектродного расстояния от 20 (колебательный режим, $\eta = 0,55$) до 50 мм (практиче-

ски согласованный режим, $\eta = 0,75$). Далее все три ковша одновременно поступали на заливку образцов для металловедческого анализа.

На рис. 4 представлены разрезы отливок типа “стакан”, а в таблице приведены данные, позволяющие оценить степень влияния ЭГИО на структуру и свойства исследуемого металла. Если контрольные отливки характеризуются грубой крупнозернистой макроструктурой, наличием осевой рыхлости и рассредоточенных пор, то металл, прошедший предварительную обработку в жидком состоянии, имеет плотную мелкозернистую макроструктуру, узкую зону столбчатых кристаллов и четко выраженную усадочную раковину. Действие согласованного режима разряда положительно сказывается на структуре и свойствах отливок, однако, как показывают визуальный осмотр разрезов и анализ структурных данных, самая благоприятная структура относится к металлу, обработанному с использованием более короткого межэлектродного промежутка, то есть колебательного режима разряда.

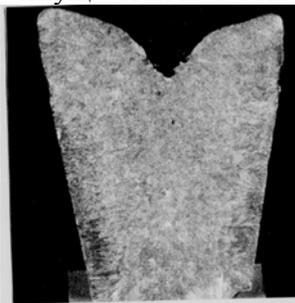
Характеристики сплава АЛ7

Характеристика сплава	Без ЭГИО	$\eta=0,75$	$\eta=0,55$
Средний диаметр равноосного макрозерна, мм	4,1	1,8	1,4
Ширина зоны столбчатых кристаллов, мм	12	6,8	5,2
Объем усадочной раковины, см ³	5,0	8,2	6,4
Размер микрозерна, мкм	47	37	27
Длина частиц CuAl ₂ , мкм	103	72	64
Плотность, г/см ³	2,783	2,818	2,875
Твердость НВ:			
- литое состояние	34	45	61
- закалка + старение	55	56	103
Микротвердость Нц твердого раствора, кг/мм ² :			
- литое состояние	59	62	72
- закалка + старение	215	243	522

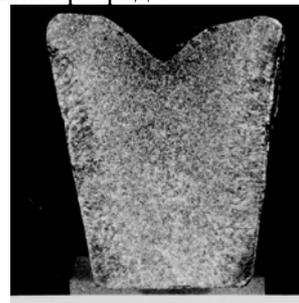
Микроструктура сплава представлена дендритами первичного алюминиевого раствора, эвтектикой Al + CuAl₂ + Si, расположенной по границам зерен, и незначительным количеством железистых фаз. Контрольные образцы характеризуются крупным микрозерном и включениями CuAl₂. После ЭГИО в опытных образцах размеры микрозерна и включений CuAl₂ заметно уменьшаются, особенно в металле, обработанном с использованием колебательного режима разряда. После обработки наблюдается также улучшение некоторых свойств сплава не только в литом, но и в термообработанном состоянии. Если для сплава, обработанного при $\eta=0,75$, увеличение твердости составляет всего несколько единиц НВ, то после ЭГИО при $\eta=0,55$ твердость металла увеличивается практически в 2 раза, что еще раз свидетельствует о преимуществах колебательного режима разряда.



Без ЭГИО



С ЭГИО; $\eta = 0,75$



С ЭГИО; $\eta = 0,55$

Рис. 4. Макроструктура сплава АЛ7

Таким образом, режим выделения энергии в канале разряда оказывает взаимно противоположное влияние на характеристики разрядного импульса давления и динамику послеразрядной паро-

газовой полости. Изменение режима разряда влечет за собой изменение баланса возмущающих сил, действующих на первой и второй стадиях ЭГИО. Экспериментальные результаты показывают, что с переходом от согласованного на колебательный режим разряда макро-, микроструктура и ряд свойств алюминиевого сплава улучшаются, что свидетельствует о преимущественной роли кавитационных процессов и первой разрядной стадии в формировании качества твердого металла, а также перспективности использования колебательного режима разряда в устройствах для ЭГИО расплава. В плане решения технических проблем, связанных с использованием этого режима, необходимо совершенствовать конструктивное исполнение электродов и прокачку разрядной камеры водой для продления ресурса электродной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективность обработки жидкого и кристаллизующегося металла в ковше и изложнице упругими колебаниями /В.М. Грабовый, В.А. Ульянов, К.П. Фоменко и др. //Процессы разливки стали и качества слитка. Киев: Наук. думка, 1989. С.35–38.
2. Волков Г.В., Грабовый В.М., Синчук А.В. Обработка чугуна концентрированными потоками энергии //Литейное производство. 1998. № 1. С. 12–14.
3. Федченко Н.А. Влияние ЭГИО на структуру и свойства вторичного силумина // Процессы литья. 2003. № 2. С. 59–64.
4. Влияние электрогидроимпульсной обработки на структуру ближнего порядка расплава многокомпонентного сплава на основе алюминия /Ю.А. Базин, Б.И. Бутаков, А.П. Тишкин и др. // Расплавы. 1992. № 3. С. 89–91.
5. Цуркин В.Н., Синчук А.В. Термодинамический анализ внешнего электрогидроимпульсного воздействия на состояние расплава перед разливкой и кристаллизацию металлов //Процессы литья. 2004. № 1. С. 6–9.
6. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наук. думка, 1979. 207 с.
7. 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.
8. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / О.В. Абрамов, В.И. Добаткин, В.Ф. Казанцев и др. М.: Наука, 1986. 277 с.
9. Петриченко В.В., Грабовый В.М., Шолом В.К. Кинетика взаимодействия мембраны и парогазовой полости при высоковольтном разряде в жидкости //Физические основы электровзрыва: Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1983. С.121–124.

Поступила 03.04.07

Summary

Influence of electrical discharge regime on the power characteristics of electrical hydro pulse treatment during the first and second stages, and on the structure and properties of solid metal is considered. It is shown experimentally, that a vibratory discharge regime has an advantage, because it provides improving quality of solid metal.
