

рис. 5. Газовыделение происходит из всех жидкостей, но дегазация проявляется при разных уровнях поднятия жидкостей.

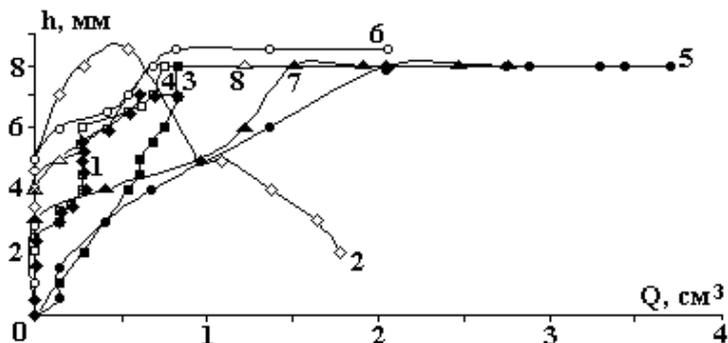


Рис. 5. Зависимость уровня высоты поднятия жидкости от количества выделившегося газа: 1 – вода; 2 – толуол; 3 – трансформаторное масло; 4 – глицерин; 5 – Арланская нефть; 6 – Западно-Сибирская нефть; 7 – Усть-Балыкская нефть; 8 – Нижневартовская нефть

Таким образом, экспериментально показано, что дегазация жидкостей существенно влияет на конвекцию в вертикальной трубе. В зависимости от температуры жидкости процесс проявляет себя по-разному, причем зависит от их физических и химических свойств.

Поступила 22.03.04

### Summary

So, there have been examined the influence processes of degasation on liquid convection in low-frequency electromagnetic field. Besides, there has been established the connection of temperature change, level of liquid's growth, the amount of separated gas and there has been revealed their dependence on the time of influence of low-frequency electromagnetic field.

В.Н. Цуркин, А.В. Синчук, А.В. Иванов\*

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

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

Импульсные концентрированные потоки акустической энергии, которые генерируются в жидком или кристаллизующемся металле, при электрогидроимпульсной обработке (ЭГИО) позволяют ощутимо изменять его структуру и свойства [1]. Этот вид внепечной обработки может успешно конкурировать с другими физическими методами активного воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, что обуславливается не только качеством обработанного литья, но и преимуществами ЭГИО по энергозатратам, простотой встраивания в существующий процесс разлива расплава, возможностью обрабатывать большие промышленные массы металла.

Дальнейшее развитие метода – в поиске оптимальных технологических режимов обработки, приводящих к стабильным требуемым показателям качества литой продукции. Но целенаправленное управление обработкой металла, оперативная перестройка схем воздействия, а также поддержание в течение длительного времени стабильных результатов обработки затруднены из-за существенной не-

\* Эксперименты выполнены совместно с Ю.Г. Бойченко, Н.К. Гумененко; металлографические исследования – совместно с Н.А. Федченко.

линейности и высокой чувствительности процессов импульсного воздействия к изменению входных параметров источника.

Попытка решать эти задачи путем формализованного математического моделирования импульсных процессов в источнике и объекте обработки, которое охватывает комплекс многофакторных взаимообусловленных явлений, имеет негарантированный результат, а экспериментальные исследования длительны и дорогостоящи [2]. Поэтому результаты исследований направлены на изучение основных закономерностей, связывающих параметры источника импульсного акустического нагружения расплава с характеристиками литого металла.

Как известно [3], при ЭГИО в ЭРГУК – электроразрядном генераторе упругих колебаний (рис.1) – в межэлектродном промежутке за счет электровзрывного преобразования энергии формируется источник силового воздействия на расплав, динамика которого претерпевает три последовательных стадии. Первая – стадия формирования токопроводящего канала, замыкающего межэлектродный промежуток. Вторая – каналная 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, являющейся вторичным источником возмущений в расплаве.

Таким образом, если непосредственно силовое воздействие на расплав осуществляется на второй и третьей стадиях разряда, то процессы первой определяют степень потерь при преобразовании электрической энергии, а значит, стабильность силовых параметров воздействия. Следовательно, для повышения эффективности и стабильности ЭГИО в рамках этой стадии очень важно минимизировать энергетические потери, которые затрачиваются на формирование канала разряда. Результаты исследований [4] позволяют находить проверенные на практике рекомендации по конструктивному исполнению электродной системы, которые обеспечивают такую минимизацию потерь. Третья, послеразрядная стадия наиболее сложная для анализа, так как силовое воздействие на расплав определяется не только энергией пульсирующей парогазовой полости, но и геометрией разрядной камеры и упругой мембраны [5]. Кроме того, на характер нагружения расплава, как показано в [6], существенно влияет воздушная прослойка между поверхностью воды и верхней крышкой ЭРГУК.

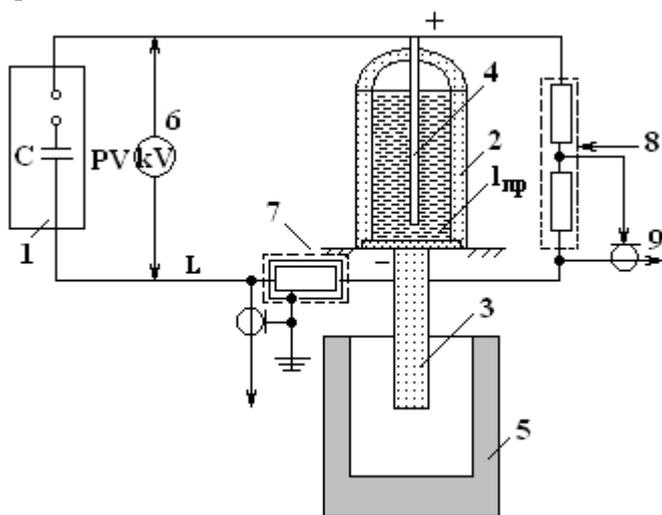


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: 1 – генератор импульсных токов; 2 – ЭРГУК; 3 – волновод; 4 – электрод; 5 – ковш с расплавом; 6 – киловольтметр; 7 – шунт; 8 – делитель; 9 – осциллограф

При математическом описании второй, разрядной стадии, как правило, все многообразие энергетических, кинетических и гидродинамических характеристик разряда, которые в свою очередь зависят от управляемых параметров разрядной цепи (емкости  $C$ , напряжения зарядки накопителя  $U_0$ , индуктивности  $L$ , длины разрядного канала  $l_p$ ), сводят к единому критерию подобия  $\eta$  [7], который характеризует режим электрического разряда:

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

где  $A$  – искровая постоянная, при свободном разряде равная  $10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$ . Что касается величины  $l_p$ , то для практических целей удобнее использовать параметр  $l_{пр}$  – длину межэлектродного промежутка,

которая, по данным [8], может быть связана с  $l_p$  соотношением  $l_p = 1,1-1,5 l_{пр}$ . Физическая сущность  $\eta$  – доля энергии, выделившейся в течение первого полупериода разрядного тока, равная нулю при коротком замыкании межэлектродного промежутка и единице при прохождении апериодического разряда. 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 до сих пор направлено конструктивное исполнение ЭРГУК.

Между тем предварительные расчеты [9] свидетельствуют, что для практического использования предпочтительнее колебательный режим разряда, соответствующий  $\eta < 0,8$ . Показано, что при колебательном разряде в расплаве обеспечиваются максимальные избыточные давления и ширина акустического спектра, оказывающие наибольшее силовое воздействие на различные структурные уровни в металле.

В работе представлены результаты, которые позволяют определить влияние режима электрического разряда в ЭРГУК на качество металла и экспериментально подтверждают выполненные ранее расчеты.

Собран экспериментальный стенд, в состав которого входит измерительная аппаратура для регистрации электрических характеристик разряда (рис.1) и определения режима выделения энергии в межэлектродном промежутке при единичном разряде. В качестве регистрирующей аппаратуры использованы двухлучевой запоминающий осциллограф С8-9А, емкостной делитель напряжения и шунт для измерения тока. Для устранения помех при передаче сигнала на осциллограф выполнен фильтр на ферритовых кольцах, обеспечивалась надежность соединения кабелей с помощью крепежных шайб и медно-графитовой смазки. Режим выделения энергии в канале разряда, значение  $\eta$  соответственно изменяли, варьируя длину межэлектродного промежутка  $l_{пр}$  от 20 до 50 мм при постоянных параметрах электрического контура  $U_0 = 50$  кВ,  $C = 1$  мкФ,  $L = 8,7$  мкГ. После обработки осциллограмм (не менее шести для каждой точки) величину  $\eta$  определяли из соотношения

$$\eta = W/W_0, \quad (2)$$

где  $W_0$  – запасаемая энергия накопителя, кДж;  $W = \int_0^{\tau} I(t)U(t)dt$  – энергия, выделившаяся в первом полупериоде  $\tau$  разрядного тока  $I(t)$ , кДж.

Потери, затрачиваемые на пробой  $W_{пр}$ , определяли как разность  $W_0 - W$  или из соотношения [4]:

$$W_{пр} = \kappa \cdot l_{пр} \cdot \sigma \cdot (S_3 + S_0), \quad (3)$$

где  $\sigma$  – электропроводность воды в камере ЭРГУК, См;  $S_3$  – площадь оголенной поверхности положительного электрода, м<sup>2</sup>;  $S_0$  и  $\kappa$  – константы.

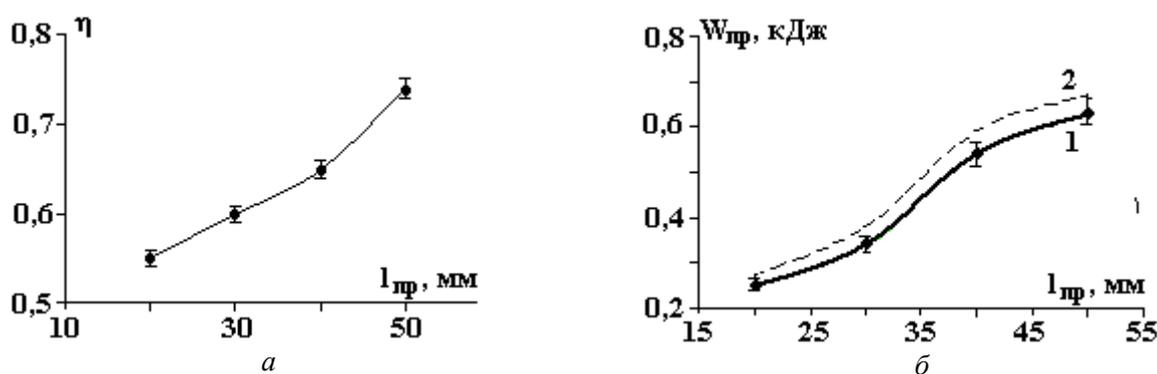


Рис. 2. Энергетические характеристики канала разряда: а – доля энергии, выделившейся в первом полупериоде разрядного тока; б – потери на пробой (1 – эксперимент, 2 – расчет по [4])

На рис. 2,а представлена экспериментальная зависимость  $\eta(l_{пр})$ , полученная из осциллограмм разрядного тока и напряжения, а на рис. 3 – осциллограммы, которые позволяют наглядно наблюдать характер единичного электрического разряда. Видно, что использованным величинам межэлектродного промежутка соответствует диапазон изменения  $\eta$  от 0,55 до 0,75, что в точке  $l_{пр} = 50$  мм соответствует практически согласованному режиму разряда, а в точке  $l_{пр} = 20$  мм – колебательному. Таким образом, при неизменных электрических параметрах цепи предельные для данного ЭРГУК межэлектродные промежутки  $l_{пр} = 50$  и 20 мм обеспечивают принципиально

различные режимы электрического разряда, что в дальнейшем использовано при ЭГИО реальных расплавов.

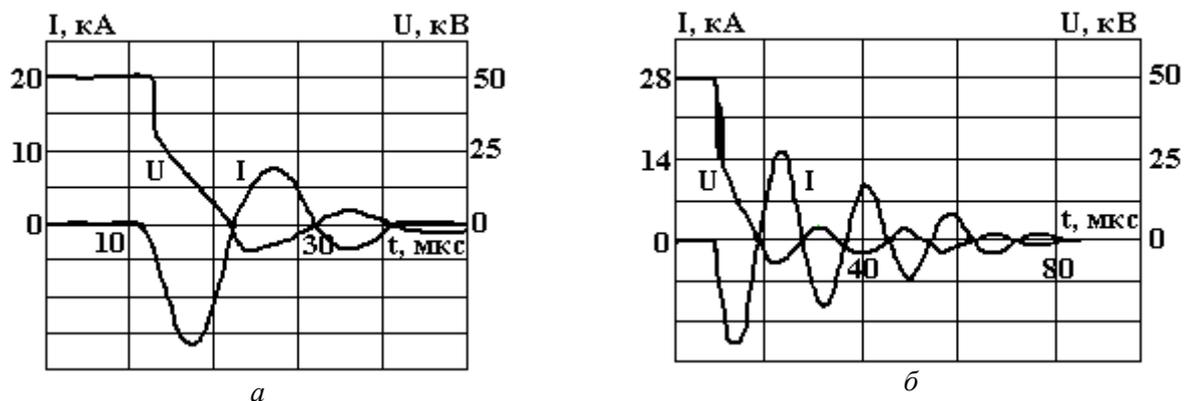


Рис. 3. Осциллограммы разрядного тока и напряжения: а – согласованный режим разряда; б – колебательный режим разряда

Кривые, представленные на рис. 2,б, иллюстрируют характер изменения потерь на пробой с ростом межэлектродного промежутка. Видно, что короткие промежутки более выгодны, так как обеспечивают уменьшение энергетических потерь на доразрядной стадии, тем самым позволяя максимально полно использовать для ЭГИО расплава накопленную энергию источника  $W_0$ . Кроме того, довольно узкий разброс значений каждой экспериментальной точки указывает на стабильное протекание первой, доразрядной стадии, что должно обеспечивать стабильность силового воздействия на расплав в течение всего времени обработки.

На втором этапе работы ЭГИО подвергали двухкомпонентный сплав Al+5%Cu, промышленным аналогом которого является литейный алюминиевый сплав АЛ7. В качестве шихтовых материалов использовали алюминиевые шины и сечку медных проводов. Выплавку производили в муфельной печи при  $T = 800^\circ\text{C}$ . После расплавления и кратковременной выдержки расплав доставали из печи, разливая в два ковша, один из которых, контрольный, отстаивался, в то время как другой, опытный, подвергался ЭГИО. Затем оба ковша одновременно поступали на разливку. Обработку осуществляли в течение 40 с, режим разряда изменяли путем регулировки межэлектродного расстояния, частота следования разрядов 1,5 Гц, значения  $U_0$  и  $C$  соответствовали величине запасаемой энергии  $W_0 = 1,25$  кДж. При этом жесткая фиксация мембраны ЭРГУК позволяла максимально ограничить влияние на расплав пульсирующей парогазовой полости, тем самым обеспечивая обработку только за счет силового воздействия от электрического канала разряда.

В табл.1 представлен номинальный химический состав сплава, содержащего помимо меди типичные для литейных алюминиевых сплавов примеси Si, Fe, Mn, Zn. Следует отметить, что среди других алюминиевых сплавов, предназначенных для фасонного литья, доэвтектический сплав АЛ7 отличается достаточно высокими механическими, но плохими литейными свойствами. В силу химического состава он достаточно отдален от эвтектической точки, имеет широкий интервал кристаллизации, обладает малой усадкой и склонен к образованию пористости. Поэтому получение качественных плотных отливок из этого сплава представляется проблематичным.

Таблица 1. Содержание химических элементов в сплаве, % мас.

$l_{пр}$ , мм	Сплав	Cu	Si	Fe	Mn	Zn
–	контрольный	5,04	0,1	0,26	0,004	0,01
50	опытный	5,02	0,1	0,44	0,005	0,03
–	контрольный	4,93	0,1	0,37	0,005	0,01
20	опытный	4,85	0,1	0,40	0,004	0,02

На рис. 4 представлены разрезы отливок типа “стакан”, а в табл.2 приведены показатели структуры и свойств металла, из которых видно, что с помощью ЭГИО можно устранять перечисленные недостатки и существенно улучшать качество литого металла. Контрольные отливки характеризуются грубой крупнозернистой макроструктурой, наличием осевой рыхлости и рассредоточенных пор. В это же время металл, прошедший предварительную обработку в жидком состоянии, обладает плотной мелкозернистой макроструктурой, узкой зоной столбчатых кристаллов и четко выраженной усадочной раковинной. Кроме того, опытный образец металла характеризуется повышенными значениями физической плотности. Как показывают визуальный осмотр разрезов и

анализ структурных данных, самая благоприятная структура относится к металлу, обработанному с использованием более короткого межэлектродного промежутка  $l_{пр} = 20$  мм, то есть при колебательном режиме разряда. Безусловно, действие согласованного режима разряда также положительно сказывается на структуре и свойствах отливок, однако переход к более коротким промежуткам и колебательному режиму выделения энергии в канале разряда, на наш взгляд, представляет дополнительные резервы ЭГИО, используемые при обработке промышленных расплавов.

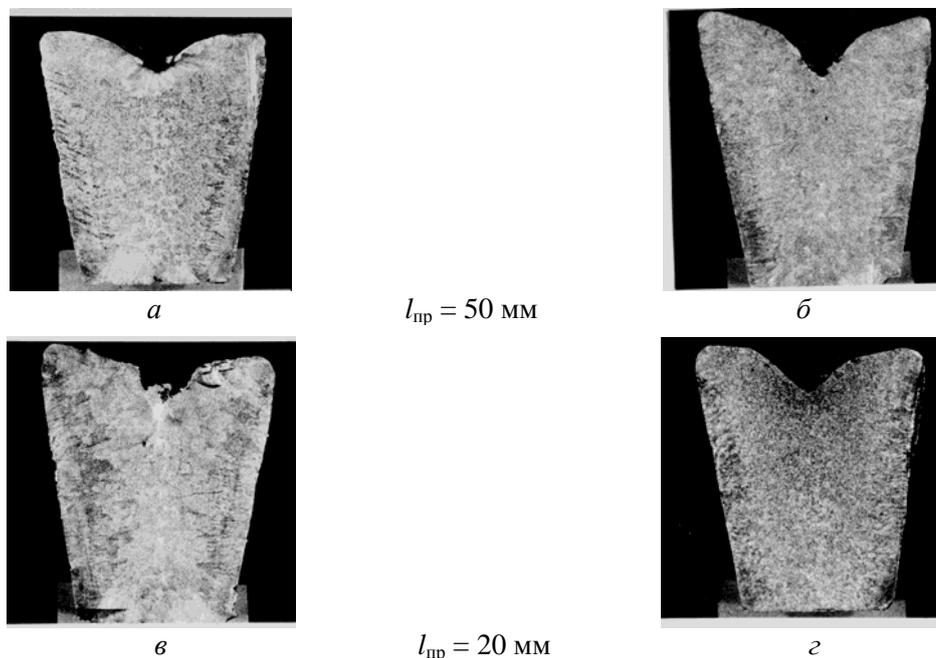


Рис. 4. Макроструктура контрольных (а, в) и опытных (б, г) образцов исследуемого сплава

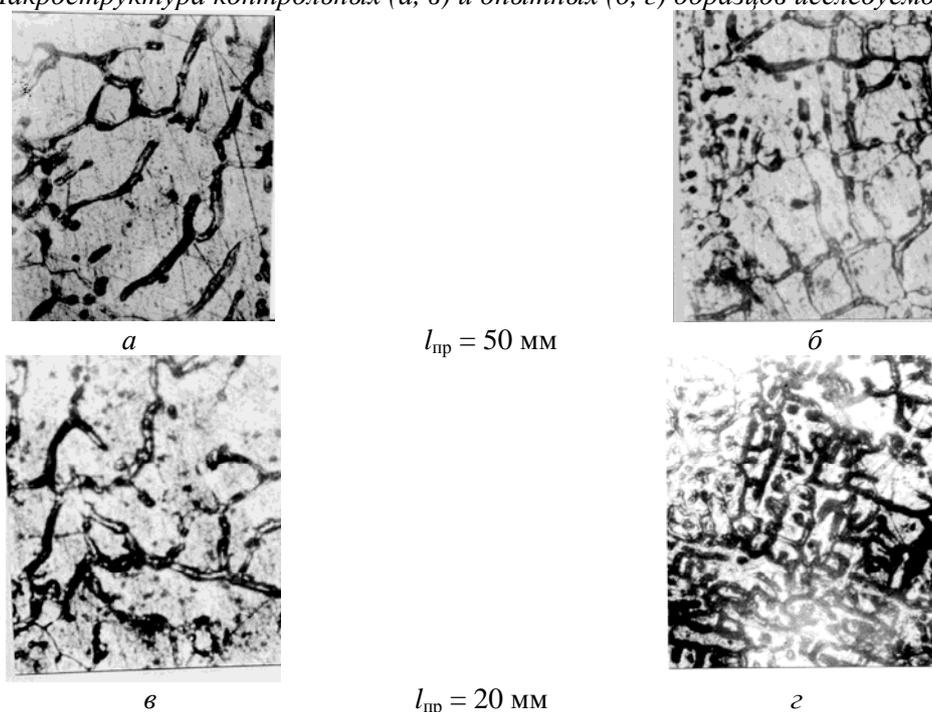


Рис. 5. Микроструктура контрольных (а, в) и опытных (б, г) образцов исследуемого сплава (x250)

Для проверки влияния режима разряда на различные структурные уровни в металле исследовали микроструктуру контрольных и опытных образцов (рис. 5, табл. 2). Микроструктура сплава представлена дендритами первичного алюминиевого раствора, эвтектикой  $Al + CuAl_2 + Si$ , расположенной по границам зерен, и незначительным количеством железистых фаз. Контрольные образцы характеризуются крупным микрозерном и включениями  $CuAl_2$ . После ЭГИО в опытных образцах размеры микрозерна и включений  $CuAl_2$  заметно уменьшаются, особенно в металле,

обработанном с использованием колебательного режима разряда. Кроме того, измельчение микроструктурных составляющих проявляется в улучшении механических свойств сплава, в частности его твердости. Если для сплава, обработанного при  $l_{пр} = 50$  мм, увеличение твердости составляет всего несколько единиц НВ, то после ЭГИО при  $l_{пр} = 20$  мм твердость металла увеличивается практически в два раза, что еще раз свидетельствует о преимуществах колебательного режима разряда.

Таблица 2. Характеристики сплава

Параметры	$l_{пр} = 50$ мм		$l_{пр} = 20$ мм	
	контрольный	опытный	контрольный	опытный
Средний диаметр равноосного макрозерна, мм	2,3	1,8	4,1	1,4
Ширина зоны столбчатых кристаллов, мм	8,5	6,8	12	5,2
Объем концентрированной усадочной раковины, см <sup>3</sup>	7,1	8,2	5,0	6,4
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,708	2,818	2,783	2,875
Диаметр микрозерна, мкм	44	37	47	27
Длина частиц CuAl <sub>2</sub> , мкм	115	72	103	64
Твердость НВ	39	45	34	61

Таким образом, результаты работы подтверждают выдвинутое ранее [9] предположение о влиянии режима неиницируемого электрического разряда на степень развития акустического возмущения в обрабатываемом при ЭГИО расплаве, о чем непосредственно свидетельствуют структура и свойства реальных отливок. Макро-, микроструктура и ряд свойств металла существенно улучшаются при переходе от согласованного на колебательный режим разряда. Колебательный режим разряда характеризуется малыми энергетическими потерями, высокой стабильностью, позволяет более полно использовать для обработки накопленную электрическую энергию, а значит, эффективнее обрабатывать расплавы и применяться в практике. Конструктивное исполнение ЭРГУК для ЭГИО должно предусматривать возможность регулировки межэлектродного расстояния для обеспечения необходимого характера электрического разряда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Г.В., Грабовый В.М., Синчук А.В. Обработка чугуна концентрированными потоками энергии // Литейное производство. 1998. № 1. С. 12–14.
2. Анищенко Л.М., Лавренко С.Ю. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов. М., 1986.
3. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. К., 1990.
4. 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.
5. Шепелева Т.В., Шамко В.В., Атанов Г.А. Гидродинамические аспекты электровзрыва в жесткой сферической оболочке // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. К., 1980. С. 113–122.
6. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний // Электронная обработка материалов. 2003. № 6. С. 63–69.
7. Окунь И.З. Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости. Ч. 1 // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 5. С. 837–845.
8. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. К., 1979.
9. 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.

Поступила 21.06.04

## Summary

The electrical hydro pulse treatment of casting aluminium alloy, which belongs to Al-Cu system, with using the various regimes of electrical discharge is carried out. It is shown, that the vibratory discharge regime has the most effective influence on structure and properties of castings.