

В.Н. Цуркин, А.В. Мельник

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОРАЗЯДНОГО ГЕНЕРАТОРА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА НА ПОСЛЕРАЗЯДНОЙ СТАДИИ

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

Введение

Проблема повышения качества литого металла решается совокупностью технологических приемов, используемых на всех стадиях металлургического передела. Причем обработка жидкого металла вне печного агрегата позволяет как существенно нивелировать отрицательное влияние металлургической наследственности, так и обеспечить более эффективную кристаллизацию и затверждение, выравнивание химического состава в объеме литого металла, удаление вредных примесей и т.п. Условием расширения функциональных возможностей методов внепечной обработки расплава служит дальнейшее развитие научных представлений о механизмах воздействия и путях повышения его эффективности [1, 2]. Методы, основанные на внешнем физическом воздействии на расплав, так же как другие приемы обработки жидкого металла, не являются универсальными, но их multifunctionality обеспечивает им широкий набор технологических возможностей [1–3]. В их числе – электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) расплава, которая характеризуется импульсом достаточно высокой мощности, широкополосным спектром частот генерируемого в расплав импульса давлений и регулируемыми параметрами воздействия. Возмущения в жидкий металл при таком способе обработки передаются через подвижный элемент (пластину с волноводом) электроразрядного генератора упругих колебаний (ЭРГУК) [4], общий вид которого представлен на рис.1. Структура же и свойства литого металла зависят от величины и характера импульсно-периодической нагрузки, передаваемой на стадии обработки в жидкий металл. Если при расширении канала разряда (активная стадия) нагрузка в расплав генерируется через передающий элемент посредством волновых процессов, то на послеразрядной стадии (пассивная стадия) передающий элемент ЭРГУК движется как абсолютно твердое тело. Длительность активной стадии, как правило, не превышает 200 мкс [5], пассивная стадия продолжается в течение нескольких миллисекунд. Поэтому управление высокочастотной составляющей передаваемой нагрузки на разрядной стадии целесообразно осуществлять, изменяя параметры разрядного контура, а низкочастотной составляющей – после стадии разряда – варьируя геометрическими характеристиками генератора.

К сожалению, в научных изданиях отсутствуют сведения о влиянии геометрических характеристик ЭРГУК на перемещение рабочего элемента в жидком металле при пассивной стадии, энергетические показатели которой могут быть соизмеримы и даже существенно превышать аналогичные для канальной стадии разряда [4–6]. Цель работы – показать возможность управления параметрами нагружения жидкого металла при ЭГИО на послеразрядной стадии за счет геометрических характеристик ЭРГУК.

Теоретическое исследование

В работе [7] с позиций теории упругости и гидромеханики на основе численного моделирования количественно описаны процессы, происходящие в технологической установке при ЭГИО расплава в ковше. Однако анализ напряженно-деформированного состояния упругой системы проведен только для активной стадии разряда.

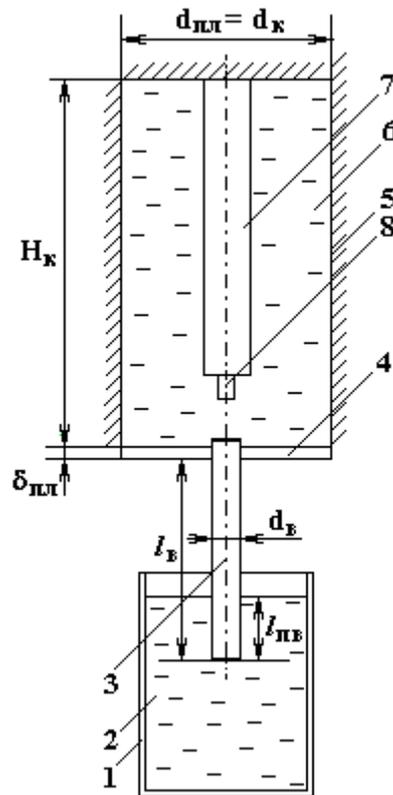


Рис. 1. Общий вид ЭРГУК:

1 – ковш; 2 – расплав; 3 – волновод; 4 – пластина; 5 – разрядная камера; 6 – вода;
7 – электрод; 8 – токовод

Известно, что при электровзрыве в ограниченном объеме, кроме ударных волн и гидропотока, обеспечивающих воздействие на объект обработки, присутствует еще и квазистатическое давление, возникающее при расширении парогазовой полости (ПГП) [4–6]. Это давление растет при расширении ПГП на послеразрядной стадии от гидростатического до максимального, остается в течение некоторого времени постоянным, а затем снова уменьшается до гидростатического. Экспериментальные исследования механизма нагружения пластин при электрогидроимпульсной штамповке в замкнутом объеме показали, что вклад квазистатического давления в деформацию образцов составляет приблизительно 70%, а для ударных волн и гидропотока эти значения лежат в пределах 20 и 10% соответственно [8]. Проводя аналогию для ЭГИО, можно предположить, что на послеразрядной стадии в расплав генерируются достаточно высокие уровни давлений.

При моделировании колебательного движения передающего элемента ЭРГУК, согласно рекомендациям [7], рассмотрим задачу колебаний пластины в одномерной постановке с учетом массы волновода, который считается абсолютно жестким телом, колеблющимся соответственно перемещению полюса пластины.

Приняты следующие допущения:

- жидкость, заполняющая разрядную камеру, идеальна и сжимаема;
- движение рабочего элемента начинается из положения статического равновесия;
- деформирование пластины происходит упруго, согласно закону Гука для изотропных сред;
- в местах крепления пластины к поверхности камеры принято условие жесткого защемления (в движении участвует 30% массы пластины);
- диаметр пластины равен диаметру разрядной камеры;
- осесимметричная нагрузка от квазистатического давления равномерно распределена по всей поверхности пластины;
- в энергию ПГП переходит 30% от энергии, выделившейся в искровой канал [5];
- волновод имеет форму кругового цилиндра;
- теплопередача от жидкого металла к волноводу не учитывается.

Приняты следующие граничные условия:

- равенство давлений в ПГП и в жидкости на границе раздела сред;

– на границах раздела жидкости, пластины и стенок камеры принято условие непротекания. Внешняя нагрузка от квазистатического давления принималась в форме полуволны синусоиды:

$$F(t) = S_{\text{пл}} P_{\text{max}} \sin \frac{2\pi}{\tau} t,$$

где $S_{\text{пл}}$ – площадь упругой пластины; P_{max} – амплитуда квазистатического давления; τ – период пульсации ПГП; t – время.

Величина максимального давления, действующего на пластину при расширении ПГП, находится из уравнения состояния жидкости в форме Тэта и оценивается выражением [9]:

$$P_{\text{max}} = \frac{P_0 + B}{\left(1 - \frac{V_{\text{ПГП}}}{V_{\text{к}}}\right)^n} - B,$$

где B и n – константы для воды, равные $B \approx 3,02 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$; $n=7$; P_0 – давление невозмущенной жидкости; $V_{\text{ПГП}}$ – максимальный объем ПГП; $V_{\text{к}}$ – объем камеры. Эта формула справедлива для сферической разрядной камеры, однако при оценочных расчетах ее можно применить для камеры цилиндрической формы.

Согласно данным эксперимента [9], значение максимального радиуса полости можно принять равным 1/4 радиуса ПГП в открытом объеме, который определяется по формуле

$$R_{\text{max}} = \left(\frac{3E_p}{4\pi P_0}\right)^{1/3},$$

где E_p – запасаемая энергия.

Время действия нагрузки τ принято равным 1/10 от периода ПГП в открытом объеме [9], величина которого находится по формуле Виллиса:

$$\tau_0 = 1,14 \sqrt{\rho_0} \frac{(E_p)^{1/3}}{(P_0)^{5/6}},$$

где ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости.

Учитывается только первая пульсация, так как вторая является довольно слабой и чаще всего уже после первой пульсации полость разрушается [4].

Демпфирующие свойства расплава характеризуются диссипативными силами волнового

$$F_1 = \rho_p c_p S_B \frac{dx_B}{dt}$$

и вязкостного сопротивления

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho_p S_B C_{\text{сопр}} \left(\frac{dx_B}{dt}\right)^2,$$

где ρ_p – плотность расплава; c_p – скорость звука в расплаве; S_B – площадь поперечного сечения волновода; $C_{\text{сопр}}$ – коэффициент сопротивления движению волновода в расплаве, зависящий от его диаметра и длины погруженной в расплав части [10]; x_B – смещение торца волновода.

Присоединенная масса жидкого металла $m_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \rho_p V_{\text{пв}}$ и восстанавливающая сила $F_3 = \rho_p g S_B x_B$, (где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент присоединенной массы жидкости для вертикально погруженного цилиндра [11]; $V_{\text{пв}}$ – объем погруженной части волновода; g – ускорение силы тяжести), зависят от глубины погружения волновода, которая составляет 1/3 его длины.

Сила упругости подвижного элемента

$$F_4 = k_{\text{пл}} x_B,$$

где $k_{\text{пл}}$ – коэффициент упругости пластины, определяется из закона Гука аналогично [12], но рассматривается прогиб жестко закрепленной по внешнему контуру пластины с центральным абсолютно жестким диском [13].

С учетом принятых допущений динамическую модель ЭРГУК при ЭГИО расплава в ковше можно представить в виде колебательной системы с одной степенью свободы, имеющей упругий

элемент и демпфер (см. рис.2). Возмущающая сила соответствует равномерно распределенной осесимметричной нагрузке, создаваемой квазистатическим давлением.

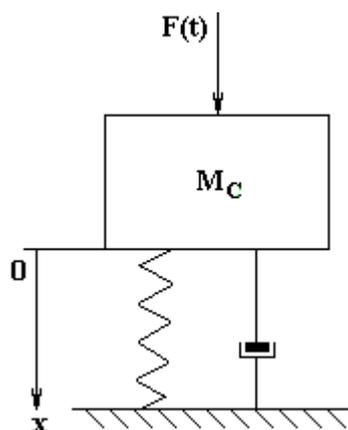


Рис. 2. Динамическая модель ЭРГУК при ЭГИО расплава в ковше

На основании численного решения дифференциального уравнения движения колебательной системы

$$\frac{d^2 x_B}{dt^2} = \frac{\sum_{i=1}^4 F_i}{M_c},$$

где M_c – масса колебательной системы, проведены оценки амплитуды затухающих колебаний торца волновода в зависимости от его диаметра, толщины и диаметра пластины при различных значениях энергии, выделившейся в канале разряда. Уравнение решалось методом Рунге-Кутты 4-го порядка на временном отрезке от 0 до 8 мс с шагом 2 мкс.

Обсуждение результатов

Расчеты выполнены при значениях энергии разряда 1, 2 и 3 кДж. Геометрические параметры ЭРГУК приведены на рис.1. Высота камеры H_k составляла 270 мм. Толщина пластины $\delta_{пл}$ принималась равной 10, 16 и 20 мм, ее диаметр $d_{пл}$ – 100, 300 и 400 мм, а диаметр волновода d_B – 40, 60 и 80 мм при длине l_B , равной 900 мм. Материал упругой пластины и волновода – Ст 3, объект обработки – расплав Fe. Приведенные характеристики соответствуют тем, которые используются в реальных установках промышленного назначения для ЭГИО металла в ковше.

Численный эксперимент показал, что с увеличением толщины пластины (см. рис. 3) и диаметра волновода (см. рис. 4,а) амплитуда уменьшается почти на порядок, появляются высокочастотные составляющие в основном перемещении пластины, а частота затухающих колебаний увеличивается. С повышением запасенной энергии амплитуда торца волновода и длительность основного перемещения увеличиваются, частота затухающих колебаний практически не изменяется (см. рис. 4,б).

При увеличении диаметра пластины и соответственно диаметра камеры существенно повышается амплитуда колебаний волновода, сокращается длительность основного перемещения и значительно падает частота затухающих колебаний (см. рис. 5,а). Увеличение диаметра волновода несколько снижает амплитуду основного перемещения и частоту затухающих колебаний (см. рис. 5,б).

На базе приведенной модели проведены расчеты при параметрах системы, аналогичных данным работы [7]. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что амплитуды первого полупериода колебаний торца волновода практически совпадают. Далее амплитуда и период затухающих колебаний от воздействия квазистатического давления расширяющейся ППП значительно снижаются. При нагрузке от давления канала разряда процесс затухания колебаний менее интенсивен.

Таким образом, в процессе проектирования установки при определении динамических характеристик ЭРГУК необходимо учитывать как воздействие давления разрядного канала активной стадии [7], так и нагрузку от ППП на пассивной стадии разряда, что представляет собой отдельную задачу. Данное замечание подтверждается экспериментом. В монографии [4] представлена осциллограмма импульса основного перемещения рабочего элемента, из которой видно, что срез импульса перемещения выпуклый и “затянутый” за счет действия квазистатического давления.

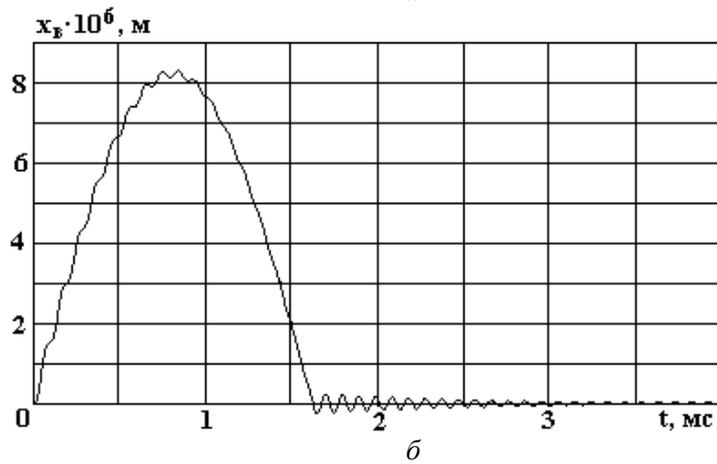
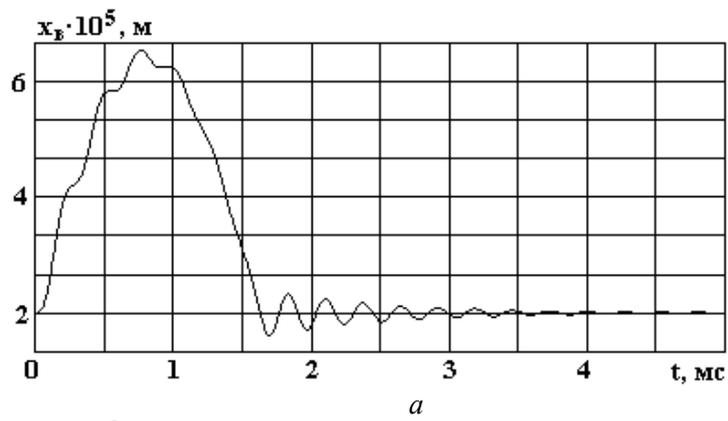


Рис. 3. Перемещение торца волновода ($E_p=1$ кДж; $d_{nl}=100$ мм; $d_6=40$ мм).
 $\delta_{nl}, \text{мм}$: а – 10; б – 20

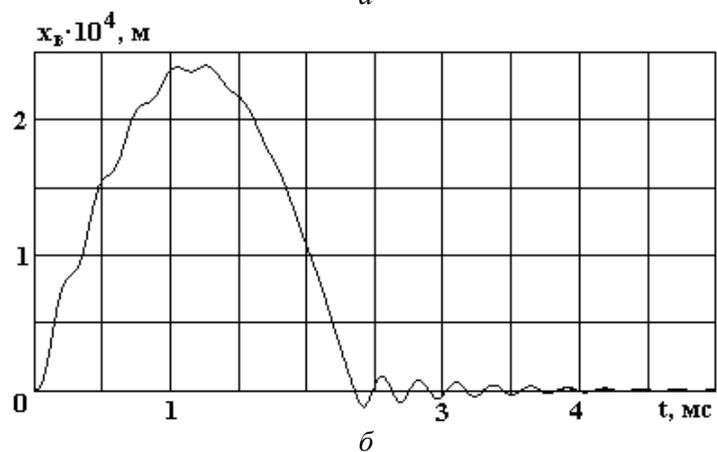
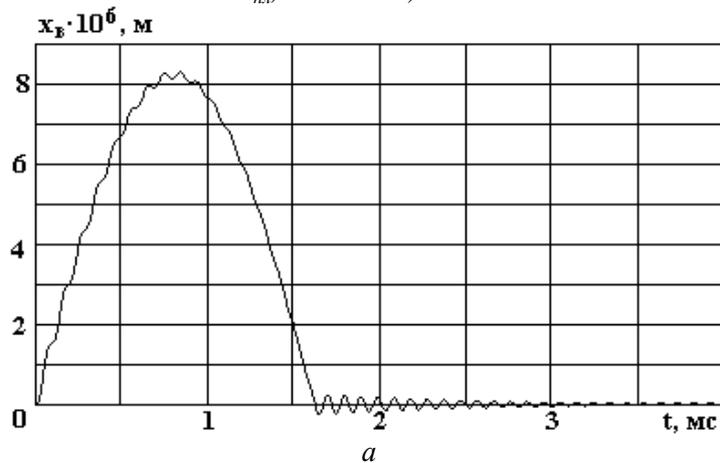
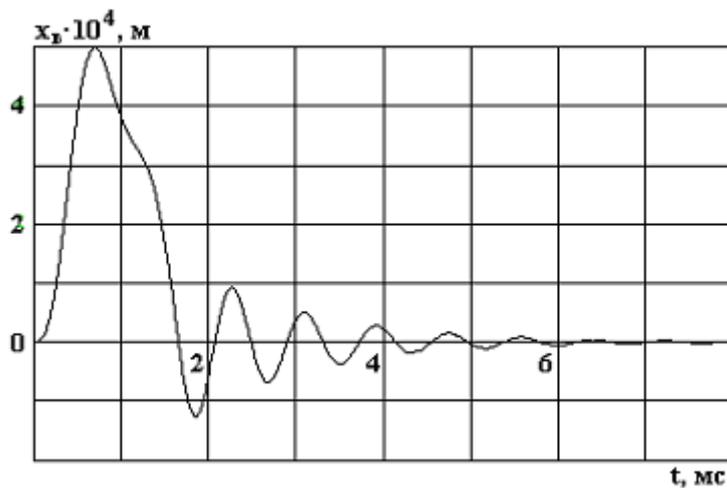
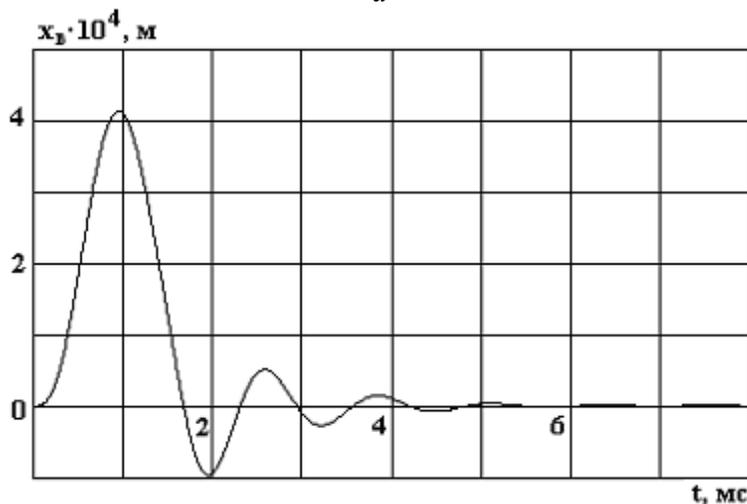


Рис. 4. Перемещение торца волновода ($d_{nl}=100$ мм; $\delta_{nl}=10$ мм).
 E_p , кДж: а – 1; $d_6=80$ мм; б – 3; $d_6=40$ мм



a



б

Рис. 5. Перемещение торца волновода ($E_p=1$ кДж; $d_{nl}=400$ мм; $\delta_{nl}=20$ мм).
 d_0 , мм: а – 40; б – 80

Выводы

1. Перемещение рабочего элемента ЭРГУК представляет собой результирующее движение от воздействия давления канала разряда и квазистатического давления ППП.
2. При проектировании ЭРГУК, варьируя геометрическими характеристиками его элементов, можно регулировать параметры нагружения и управлять механизмом воздействия на обрабатываемый металл при ЭГИО расплава в ковше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Найдек В.Л. Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового использования // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. Киев, 1998. С. 133–154.
2. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М., 1995.
3. Грабовый В.М. Экономичность и эффективность способов внешнего физического воздействия на расплав // Материалы V Международной научной школы-семинара “Импульсные процессы в механике сплошных сред”. Николаев, 2003. С.88–90.
4. Поздеев В.А., Царенко П.И., Бутаков Б.И., Малюшевский П.П. Электроразрядные генераторы упругих колебаний. Киев, 1985.
5. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев, 1990.
6. Шепелева Т.В., Шамко В.В., Атанов Г.А. Гидродинамические аспекты электровзрыва в жесткой сферической оболочке // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. Киев, 1980. С. 113–122.

7. 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.
8. Теляшов Л.Л., Дорофеев С.А., Нестеров А.М., Ляшко Л.П. Исследование механического нагружения заготовок при различных условиях проведения электрического разряда в воде // Физические основы электрогидравлической обработки материалов. Киев, 1978. С. 98–104.
9. Литвиненко В.П., Шамко В.В., Деревянко Ю.И. Влияние жесткой оболочки на динамику парогазовой полости // Основные проблемы разрядно-импульсной технологии. Киев, 1980. С. 50–61.
10. Справочник по теории корабля: В 3-х томах. Т.1. Гидромеханика. Соппротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. Л., 1985.
11. Короткин А.И. Присоединенные массы судна: Справочник. Л., 1986.
12. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний // Электронная обработка материалов. 2003. № 6. С. 63–69.
13. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. Киев, 1970.

Поступила 13.10.05

Summary

On the basis of numerical modeling the estimate of damping amplitude caused by means of electrical discharge guide generator of elastic vibrations during the post-discharge phase of electrical hydro pulse treatment of melt in the foundry ladle is completed. Possibility to control over the exposure parameters by means of geometrical characteristics variation of plant elements is shown.
