

В.Н. Цуркин, А.В. Мельник

ПРОЦЕССЫ И ХАРАКТЕР НАГРУЖЕНИЯ РАСПЛАВА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ КОЛЕБАНИЙ НА УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТАХ. ЧАСТЬ II (РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, dpta@iipr.com.ua, iipr@iipr.com.ua*

Введение

Функциональные возможности электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) расплава в ковше определяются формированием в жидком металле различных физических процессов (внутренних структурно-кинетических изменений), способствующих повышению качества литого металла [1, 2]. Расплав является акустической средой, поэтому возникающие при его нагружении импульсные возмущения создают в этой среде нестационарное поле давлений – основной фактор воздействия на структуру литого металла.

Источником возмущений в расплаве при ЭГИО служит электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК), который через рабочий элемент (мембрану с волноводом) воздействует на жидкий металл посредством упругих волн.

Исследованиям гидродинамических явлений в жидком металле при ЭГИО расплава в ковше посвящен ряд публикаций [3, 4], однако приведенные в них результаты ограничены стандартными расчетными схемами технологических установок. Кроме того, вне поля зрения исследователей остался вариант конструктивного исполнения торца передающего элемента с плоской круговой насадкой, диаметр которой в несколько раз превышает диаметр волновода. Применение такой конфигурации может существенно расширить функциональные возможности ЭГИО.

Цель работы заключается в определении методами численного моделирования гидродинамических процессов, происходящих в расплаве под воздействием рабочих параметров ЭРГУК на упругих элементах, нестационарного поля давлений, возникающего в обрабатываемом металле на после-разрядной стадии обработки.

Теоретическое исследование

Примем постановку плоской двумерной осесимметричной задачи о распространении возмущений в акустической среде (расплаве) (рис. 1). Геометрические параметры конструктивных элементов и физические свойства расплава соответствуют принятым в первой части работы [5]. В связи с тем что основной вклад в формирование возмущений вследствие распространения продольных волн оказывает торец волновода, а не его боковая поверхность, учитывается воздействие только от волноводной насадки в виде плоского абсолютно жесткого диска, погруженного в расплав на определенную глубину. При этом локальными рабочими зонами эффективного воздействия считаются вся нижняя плоскость насадки, а также часть ее верхней плоскости до места крепления к торцу волновода (см. рис. 2). Область насадки непосредственно под торцом волновода, где эффекты от воздействия проявляются несущественно, условно назовем “глухой” зоной.

Поскольку скорость движения торца волновода мала по сравнению со скоростью звука в металлическом расплаве [3], а величина давления разрежения ограничивается механизмом образования кавитационных процессов [6], будем описывать движение расплава в акустическом приближении с помощью волнового уравнения в потенциалах скорости при условии возникновения кавитации:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - c_0^2 \left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) \right] = 0 \text{ при } P > P_{кр}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \frac{P_{кр} - P}{\rho_0} = 0 \text{ при } P \leq P_{кр}, \quad (2)$$

где $\psi(r, z, t)$ – потенциал скорости; $V_z = \frac{\partial \psi}{\partial z}$, $V_r = \frac{\partial \psi}{\partial r}$ – осевая и радиальная составляющие скорости; ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в жидком невозмущенном металле соответственно; r, z – пространственные координаты; t – время; P и $P_{кр}$ – давление и прочность при статическом растяжении в расплаве соответственно.

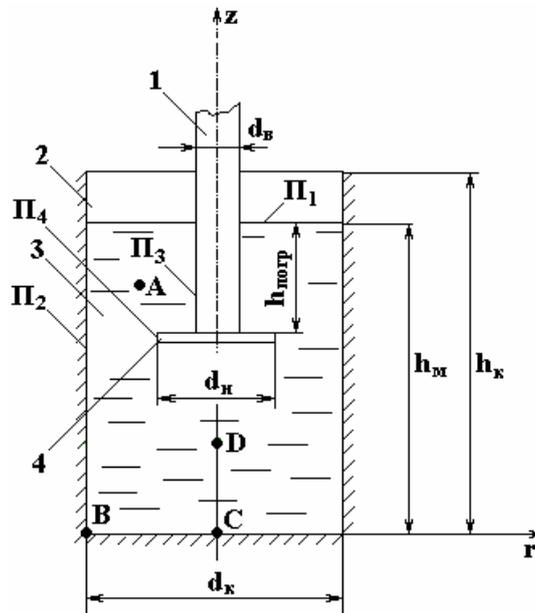


Рис. 1. Схема обработки расплава в ковше волноводом с насадкой:
1 – волновод; 2 – ковш; 3 – расплав; 4 – волноводная насадка

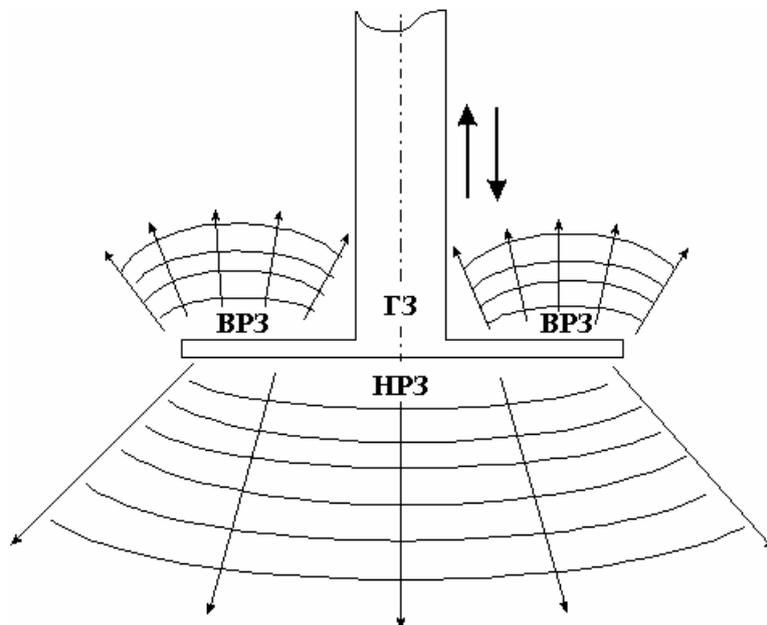


Рис. 2. Зоны воздействия на расплав при ЭГИО:
НРЗ – нижняя рабочая зона; ВРЗ – верхняя рабочая зона; ГЗ – «глухая» зона

Давление в зоне развитой кавитации соизмеримо с давлением насыщенных паров жидкости, поэтому для удобства расчетов примем допущение $P_{кр}=0$.

Связь потенциала скорости с давлением выражается зависимостью

$$P = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial t}.$$

На стенках ковша Π_2 , боковых поверхностях волновода Π_3 и насадки Π_4 ставятся граничные условия непротекания (нормальные компоненты скорости равны нулю):

$$\frac{\partial \psi}{\partial \vec{n}} = 0,$$

где \vec{n} – нормаль к поверхности. На свободной поверхности расплава Π_1 избыточное давление равно нулю, то есть выполняется условие $\frac{\partial \psi}{\partial t} = 0$.

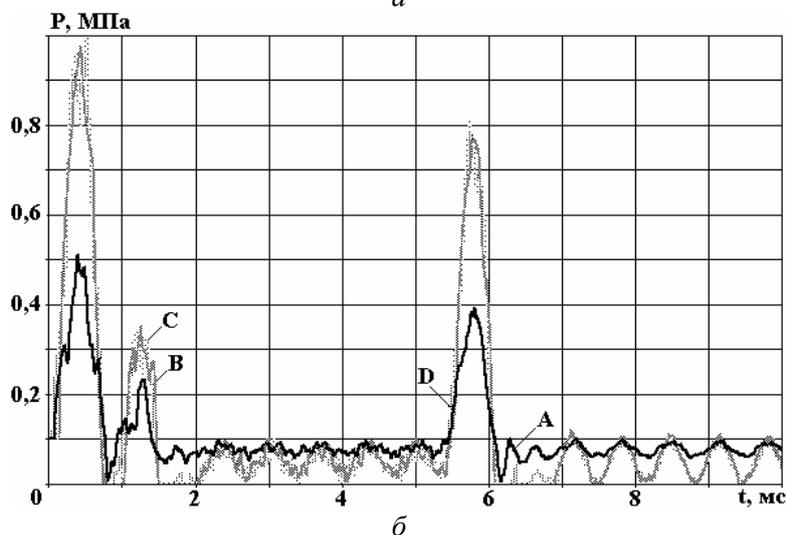
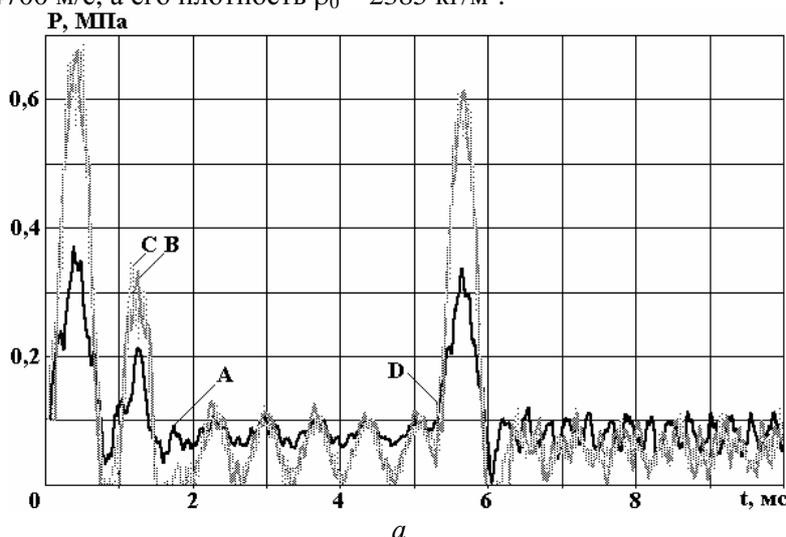
Начальными условиями являются значения скорости торца волновода, рассчитанные при исследовании динамики волноводно-излучательной системы на предыдущем этапе [5]. Отметим, что уравнение (1) учитывает также явление отражения волн от стенок ковша, боковой поверхности волновода, верхней и нижней плоскостей насадки, а также свободной поверхности расплава.

На основе численного решения уравнений (1) и (2) рассчитаны зависимости давления от времени в жидком металле в различных точках ковша (см. рис. 1). Варьируемый параметр – диаметр волноводной насадки d_n .

Волновое уравнение (1) решалось конечно-разностным методом по явной трехслойной схеме “крест”.

Обсуждение результатов

Результаты численного моделирования приведены на рис. 3 в виде графических зависимостей величины давления от времени для трех значений d_n , а также для волновода без насадки в заданных точках ковша (см. рис. 1). Точка A расположена на расстоянии $d_n/4$ от оси симметрии ковша (ось z) и на глубине $h_{\text{погр}}/2$. Расположение точки D по оси z соответствует координате $(h_m - h_{\text{погр}})/2$. Расчеты выполнены для расплава Al и соотношения жесткости упругих элементов и мембраны $k_1/k_2=0,1$. Ковш представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 1 м, равным его высоте. Глубина погружения волновода равна половине высоты ковша. Скорость звука c_0 в расплаве Al примем равной 4700 м/с, а его плотность $\rho_0 = 2385 \text{ кг/м}^3$.



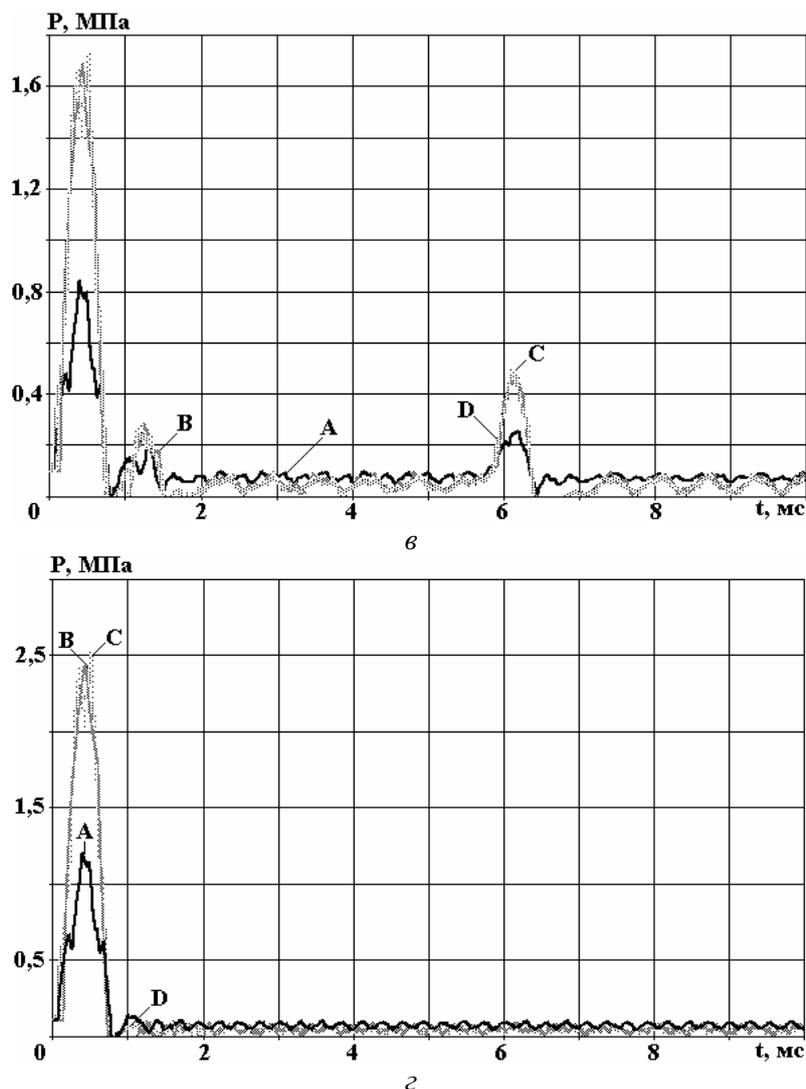


Рис. 3. Зависимость давления от времени в расплаве при ЭГИО в ковше:
а – обработка без волноводной насадки; *б* – обработка волноводной насадкой диаметром 30 мм;
в – обработка волноводной насадкой диаметром 50 мм; *г* – обработка волноводной насадкой
 диаметром 70 мм

Анализ полученных результатов показывает, что давление в расплаве представляет собой последовательность импульсов. В точках *С* и *Д* эти импульсы имеют два выраженных максимума, причем в первом импульсе второй максимум по величине превышает первый. Для точки *В* характерен один максимум. Давление в точке *А* почти в два раза ниже, чем в других точках, а первый импульс имеет четыре максимума. В промежутках между импульсами давление в жидком металле падает ниже атмосферного и в определенные моменты времени снижается почти до нуля, то есть возникает кавитация практически по всему объему ковша. Наличие волноводных насадок повышает уровни давления на начальной стадии обработки. С увеличением диаметра насадки, например с 30 до 70 мм, давление в точке *С* в первом максимуме повышается с 1 до 2,5 МПа. С последующими импульсами уровни давления снижаются, что свидетельствует о значительной доле энергии диссипации при обработке волноводными насадками. Так, для волноводной насадки диаметром 70 мм на заданном временном промежутке второй импульс вообще отсутствует. Отличны и кавитационные процессы в рассматриваемых точках ковша. В точке *А* давление падает до нуля только в конце импульса давления, в остальное время уровни давления незначительно отличаются от атмосферного.

Перенос энергии в акустической среде характеризуется потоком энергии. Для характеристики направления переноса энергии в данной точке волнового поля среды используется векторная величина – плотность потока энергии. Абсолютное значение этой величины к моменту времени t для волны давления определяется по формуле [7]:

$$W_t = \frac{1}{\rho_0 c_0} \int_0^t P^2(t) dt.$$

На основании полученных зависимостей $P(t)$ (см. рис. 3) оценим значения W_t к моменту времени $t=10$ мс как для случая применения волноводной насадки, так и без нее в заданных точках ковша. Результаты оценки приведены на рис. 4 в виде графической зависимости относительных величин W_n/W_6 и d_n/d_6 , где W_n и W_6 – плотность потока энергии в данной точке ковша при использовании волноводной насадки и без нее соответственно; d_n – диаметр волноводной насадки; d_6 – диаметр волновода ($d_6 = 20$ мм). Значение W_n/W_6 изменяется пропорционально величине d_n/d_6 , например, для точек B , C и D при использовании насадки диаметром 50 мм значение W_n приблизительно в 3 раза превышает W_6 . С увеличением диаметра насадки до 70 мм W_n увеличивается относительно W_6 уже примерно в 6 раз. Для точки A эта тенденция проявляется в меньшей степени.

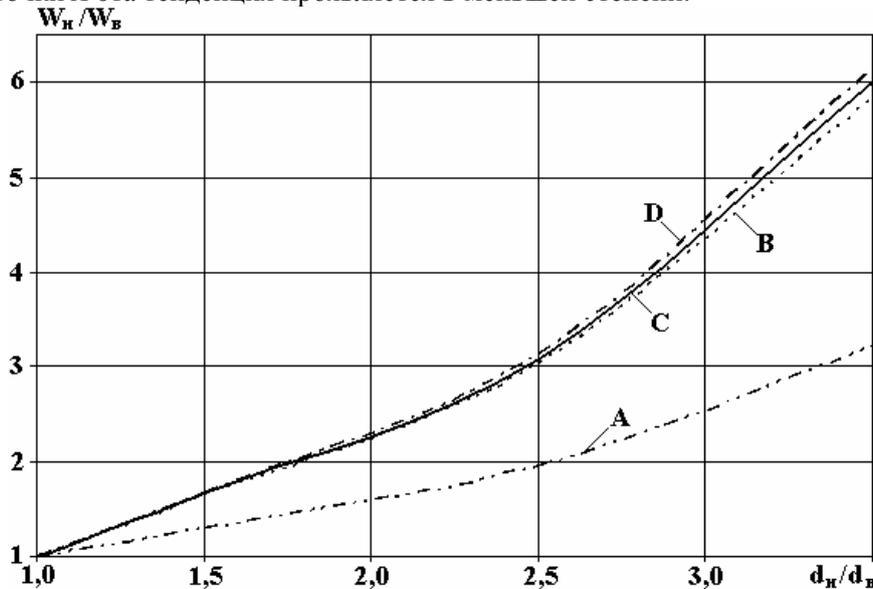


Рис. 4. Зависимость плотности потока энергии от диаметра насадки в заданных точках ковша при ЭГИО расплава

В первой части работы [5] было показано, что применение насадок способствует более интенсивному затуханию колебаний волновода в расплаве и, следовательно, увеличению доли диссипируемой энергии. Этот факт подтверждается полученными результатами, то есть волноводные насадки существенно повышают энергию, передаваемую в расплав, а значит, и одну из ее составляющих – энергию диссипации.

Проанализируем влияние волноводных насадок на процессы кавитации в расплаве. В качестве показателя эффективной обработки примем общую длительность возникновения кавитации, то есть суммарное время, в течение которого давление в расплаве приближается к нулевому значению. Пользуясь зависимостями $P(t)$ (см. рис. 3), найдем относительное время возникновения кавитации t_k/t (отношение длительности возникновения кавитации t_k к общей продолжительности процесса распространения волны давления t). Значения t_k/t в заданных точках ковша в зависимости от диаметра волноводной насадки приведены в таблице.

Относительное время возникновения кавитации t_k/t в расплаве

Точка ковша	d_n/d_6			
	1	1,5	2,5	3,5
A	0	0	0,0044	0,0056
B	0,1137	0,1691	0,1428	0,0677
C	0,1092	0,1785	0,16	0,054
D	0,0444	0,0681	0,073	0,012

Процесс возникновения и развития кавитации определяется как зоной обработки расплава в ковше, так и диаметром волноводной насадки. Для точки A , расположенной в верхней области ковша, кавитация возникает только при соотношении $d_n/d_6 \geq 2,5$. В зонах обработки под волноводом (точки

B, C, D) применение насадки диаметром 30 мм позволяет увеличить значение t_k/t примерно в полтора раза. При повышении d_n до 50 мм значение t_k/t в точках *B* и *C* несколько уменьшается, а в точке *D* возрастает. Обработка насадкой диаметром 70 мм приводит к значительному сокращению t_k/t в нижней зоне ковша под волноводом по сравнению с обработкой без насадки, что свидетельствует об ограничении функциональных возможностей обработки при дальнейшем увеличении диаметра насадки.

В работе [8] показано, что одним из основных факторов эффективного воздействия на расплав являются геометрические размеры рабочего пространства сосуда, поршня-вибратора и зазора между ними. Поэтому при проектировании технологических установок ЭГИО в зависимости от требуемых параметров обработки необходимо учитывать соотношение геометрических размеров, а также конфигурацию рабочего элемента ЭРГУК и ковша.

Таким образом, наличие волноводных насадок приводит к существенному повышению давления на начальной стадии обработки, доли диссипируемой энергии в расплаве и длительности возникновения кавитации.

Выводы

1. Применение волноводных насадок позволяет значительно повысить уровни давления в расплаве, но только на начальной стадии обработки.

2. С увеличением диаметра волноводных насадок доля диссипируемой энергии в расплаве возрастает, что приводит к внутренним структурно-кинетическим изменениям в жидком металле.

3. Продолжительность кавитационных процессов в расплаве зависит от геометрических характеристик волноводно-излучательной системы и зоны обработки.

4. Эффективность ЭГИО расплава определяется соотношением геометрических размеров, а также конфигурацией рабочего элемента ЭРГУК и ковша.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Системный анализ факторов, стабилизирующих параметры нагружения электрогидроимпульсной обработки расплава // Электронная обработка материалов. 2007. № 2. С. 52–59.
2. Цуркин В.Н., Грабовый В.М., Синчук А.В. Функциональные возможности электрогидроимпульсной обработки расплава в ковше // Электронная обработка материалов. 2006. № 5. С. 55–61.
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. Процессы и характер нагружения расплава электроразрядным генератором колебаний на упругих элементах. Часть I (Динамика волновода) // Электронная обработка материалов. 2008. № 4. С. 82–92.
6. Галиев Ш.У. Нелинейные волны в ограниченных сплошных средах. Киев: Наукова думка, 1988. 264 с.
7. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
8. Игнатьев И.Э., Киселев А.В., Долматов А.В., Концевой Ю.В., Пастухов Э.А., Игнатьева Е.В., Попова Э.А., Бодрова Л.Е. Математическое моделирование движения жидкости в цилиндрическом сосуде, возбуждаемого поршнем-вибратором // Расплавы. 2005. № 6. С. 3–11.

Поступила 02.06.09

Summary

On the basis of numeral modelling of hydrodynamic processes, which are going in melt during electrical hydro pulse treatment, the pressure field within a liquid metal during the post discharge stage is calculated. It is shown, that application of waveguide attachments allows promote the pressure levels during the initial treatment stage, increase the part of energy dissipation in melt and extend cavity duration. It is found that treatment efficiency is determined by correlation of geometrical sizes of working element and of geometrical sizes of the ladle.