

**В. В. Картузов, Я. Ю. Дмитришина\***

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

\*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДИССИПАЦИЮ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ**

*Проанализированы факторы, влияющие на диссипацию энергии в расплаве при электрогидроимпульсной обработке (ЭГИО). Показано, что наибольший вклад вносят кавитационные процессы, на которые накладывается акустическое поле. Сравнение величины диссипированной энергии с энергией связи в жидком алюминии показало, что она может оказывать существенное влияние на структуру жидкого алюминия.*

**Ключевые слова:** электрогидроимпульсная обработка, акустические волны, жидкий алюминий, диссипация энергии.

*Проаналізовано фактори, які впливають на дисипацію енергії у розплаві під час електрогідроімпульсної обробки (ЕГІО). Показано, що найбільший вклад в дисипацію енергії привносять кавітаційні процеси, на які накладається акустичне поле. Порівняння величини дисипованої енергії з енергією зв'язку у рідкому алюмінії показало, що вона може мати суттєвий вплив на структуру рідкого алюмінію.*

**Ключові слова:** електрогідроімпульсна обробка, акустичні хвилі, рідкий алюміній, дисипація енергії.

*Factors that influence on dissipation energy in melt during electrohydropulse treatment for one impulse was analysed calculated. It was shown that the cavitations processes covered by acoustic field have the highest influence. The comparison of dissipation energy with binding energy of liquid aluminum shows that electrohydropulse treatment may have significant impact on structure of liquid aluminum.*

**Keywords:** electrohydropulse treatment, acoustic waves, liquid aluminum, dissipation energy.

### **Введение**

Как известно, для достижения улучшенных показателей качества литого металла широко используют физические методы обработки расплава в печи и внепечной обработки. Зачастую они основаны на генерировании в жидком металле акустических волн, например, при ультразвуковой, электрогидроимпульсной или низкочастотной обработке [1-3]. Электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) является одним из перспективных методов влияния на структуру и свойства расплава на предразливочной стадии, изменения которых впоследствии положительно отражаются на структуре и свойствах литого металла [4]. Сущность ЭГИО заключается в генерировании упругих колебаний периодических импульсов давления, которые через волноводно-излучательную систему передаются в расплав, образуя в нем мощное акустическое поле. Энергия акустических волн используется на выполнение работы над материалом расплава, а также частично поглощается, что чаще всего относят к непродуктивным затратам. Но исследования последних лет показали и позитивную роль диссипативной энергии [5].

В работе [6] дано определение диссипации энергии как перехода части энергии упорядоченного движения в энергию неупорядоченного, а в итоге – в теплоту,

## Получение и обработка расплавов

что приводит к интенсификации теплового движения атомов в расплаве. При этом увеличивается количество энергетических флуктуаций в системе. Таким образом, термодинамическая система, в которой происходят более активные флуктуации, находится в неравновесном состоянии – таком, что последующее воздействие может привести к непредвиденным структурным преобразованиям, вследствие которых она будет приспосабливаться к текущим условиям существования. О подобных изменениях структуры либо структурно-чувствительных характеристик жидких металлов при монотонном перегреве над температурой ликвидуса указано в работе [7]. Если рассматривать и монотонный перегрев, и ЭГИО расплава как процессы высокоэнергетического воздействия на жидкий металл, следует предположить, что управление этими процессами и является ключом к управлению структурой, а значит, и свойствами жидкого металла.

Также следует отметить, что ЭГИО относится к категории многофакторных и многопараметрических технологических процессов, что существенно усложняет поиск основных принципов управления процессом воздействия ЭГИО на структуру жидкого металла.

*Цель работы* – проанализировать значимость основных факторов, влияющих на диссипацию энергии при электрогидроимпульсной обработке.

### *Постановка задачи*

При электрогидроимпульсной обработке можно выделить следующие процессы и явления, приводящие к рассеянию акустической энергии в расплаве:

- вязкость и теплопроводность;
- отражение акустической волны от стенки формы;
- кавитационные процессы.

Следует отметить, что на кавитационное облако дополнительно накладывается акустическое поле, усиливающее рассеивание энергии [8]. Таким образом, если предположить аддитивность указанных механизмов поглощения энергии акустического поля расплава, то в итоге общее выражение для энергии, которая диссипирует в расплав, можно записать в виде

$$\varepsilon_{\text{дис}} = \varepsilon_{\text{в}} + \varepsilon_{\text{отр}} + \varepsilon_{\text{кав}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{в}}$  – энергия, которая диссипирует за счет вязкости расплава;  $\varepsilon_{\text{отр}}$  – за счет отражения от стенок формы;  $\varepsilon_{\text{кав}}$  – за счет кавитационных процессов.

Как известно, поглощение звука определяется коэффициентом поглощения звука  $\alpha$  ( $\text{м}^{-1}$ ) так, что амплитуда плоской волны  $A$ , которая направлена вдоль оси  $x$ , уменьшается с расстоянием  $x$  как  $\exp(-\alpha x)$ , интенсивность  $I$  и энергия звуковой волны  $W$  – как  $\exp(-2\alpha x)$ .

$$A = A_0 \exp(-\alpha x); \quad (2)$$

$$I = I_0 \exp(-2\alpha x); \quad (3)$$

$$W = W_0 \exp(-2\alpha x), \quad (4)$$

где  $A_0$ ,  $I_0$ ,  $W_0$  – исходные значения амплитуды, интенсивности и энергии звуковой волны соответственно.

Коэффициент поглощения  $\alpha$  в общем виде для вязкой и теплопроводной жидкости в случае плоской звуковой волны определяется вязкостью и теплопроводностью среды.

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho C^3} \left[ \frac{4}{3} \eta + \xi + \chi \left( \frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right], \quad (5)$$

## Получение и обработка расплавов

где  $\eta$  – динамическая (стоксовская) вязкость расплава;  $C$  – скорость звука в расплаве;  $\omega = 2\pi$  – круговая частота звуковой волны, которая передается в расплав;  $\zeta$  – объемная вязкость;  $\rho$  – плотность жидкого алюминия. Объемная вязкость характеризует квазиравновесный обмен энергией между поступательным движением частиц в звуковой волне и внутренним состоянием свободы вещества;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $c_v, c_p$  – удельные теплоемкости жидкости.

В соответствии с формулой (5) для жидкого алюминия при разных значениях частоты  $f = \omega/2\pi$

$$\alpha = 2,5 \cdot 10^{-13} \cdot f^2, \text{ с}^2/\text{м}. \quad (6)$$

При анализе одного разрядного импульса ЭГИО условно определяют две стадии: выделение энергии в канале разряда; пульсация парогазовой полости [9].

В работах [10, 11] авторами подробно рассмотрены давления вблизи торца волновода и порождаемые ими спектры для обеих стадий ЭГИО (рис. 1-2).

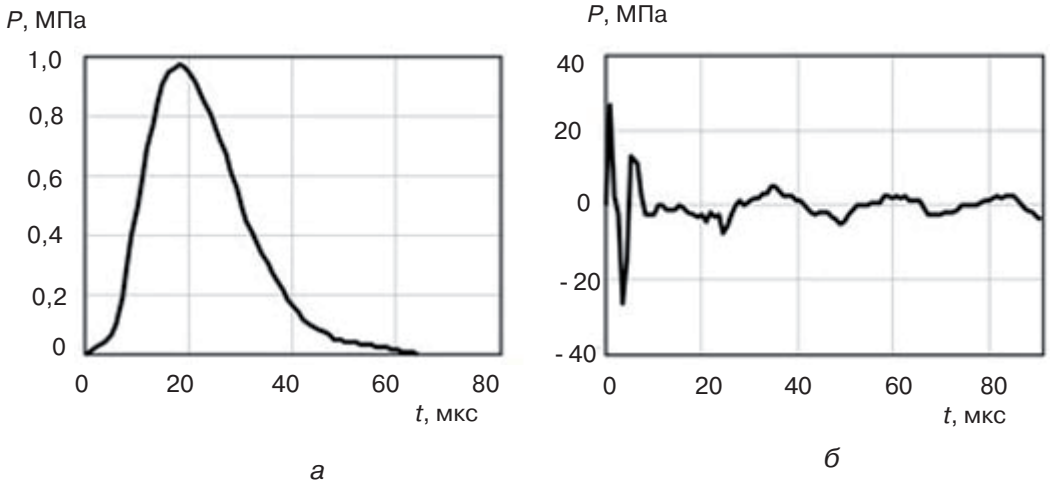


Рис. 1. Акустическое давление: а – вблизи торца волновода на стадии выделения энергии в канале разряда; б – на торце волновода на стадии пульсации парогазовой полости

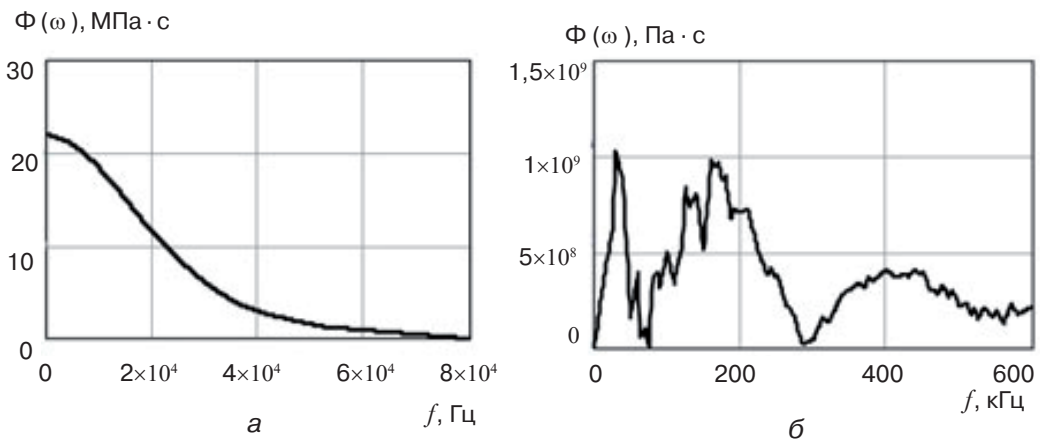


Рис. 2. Спектры акустического давления: а – вблизи торца волновода на стадии выделения энергии в канале разряда; б – на торце волновода на стадии пульсации парогазовой полости

Характеристику  $\Phi(\omega)$  поглощения спектра частот импульса давления можно записать следующим образом:

$$\Phi(\omega) = \Phi_0(\omega) \exp(-2\alpha x), \quad (7)$$

## Получение и обработка расплавов

где  $\Phi_0(\omega)$  – значение характеристики  $\Phi(\omega)$  до поглощения, при этом  $x$  является расстоянием, на котором величина  $\Phi(\omega)$  затухает в  $e$  раз (рис. 3).

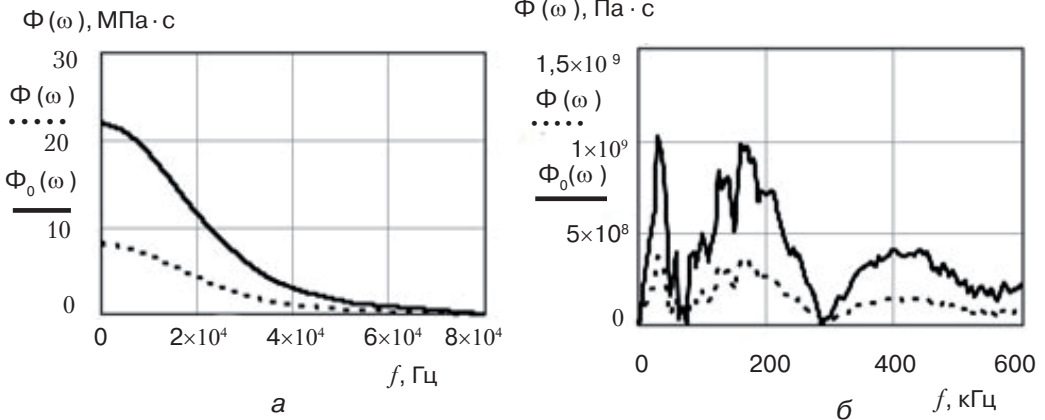


Рис. 3. Спектры акустического давления:  $\Phi_0(\omega)$  – до поглощения,  $\Phi(\omega)$  – после поглощения; а – на стадии выделения энергии в канале разряда; б – на стадии пульсации парогазовой полости

Из рис. 3 видно, что большая часть  $\Phi(\omega)$  поглощается.

Необходимо отметить, что сильное поглощение должно происходить при отражении звуковой волны от твердой стенки [12-14]. В тонком пристеночном слое жидкости возникает большой градиент температуры, который приводит к активной диссипации энергии путем теплопроводности. По аналогичной причине к большему поглощению звука при отклонении движения волны от перпендикуляра к стенке приводит также и изменение вязкости жидкости. Коэффициент поглощения энергии при отражении соответствует соотношению

$$\alpha_{\text{отр}} = 2 \frac{\sqrt{2 \cdot \omega}}{C \cdot \cos \theta} \left[ \sin^2 \theta \sqrt{\eta} + \left( \frac{c_p}{c_v} - 1 \right) \sqrt{\chi} \right], \quad (8)$$

где  $\theta$  – угол падения.

Как можно видеть, при  $\theta = 0$

$$\alpha_{\text{отр}} = 2 \frac{\sqrt{2 \cdot \omega}}{C} \left( \frac{c_p}{c_v} - 1 \right) \sqrt{\chi}, \text{ то есть соотношение определяется только процессами}$$

теплопереноса. При  $\theta \neq 0$  в поглощение звуковой волны включаются механизмы вязкости и теплопроводности.

Максимальное значение  $\alpha_{\text{отр}}$  для частоты  $f = \omega/2\pi$  соответствует соотношению

$$\alpha_{\text{отр}} = 4,46 \cdot 10^{-7} \sqrt{f}, c^{1/2} / \text{м}. \quad (9)$$

Анализ различных литературных источников показал неоднозначность трактовки процесса диссипации энергии в кавитационном облаке при наложении акустического поля. Например, в работе [15] заявлено, что диссипация акустической энергии в кавитационном облаке при наложении ультразвуковых колебаний увеличивается более чем в 100 раз (для оливкового масла), что объясняют явлением частичного отражения акустических волн от поверхности пузырьков. Акустическая кавитация представляет собой эффективный механизм концентрации энергии, когда отно-

## Получение и обработка расплавов

сительно низкая средняя плотность энергии звукового поля трансформируется в высокую плотность энергии, выделяющуюся при сжатию кавитационного пузырька [16-18]. Следовательно, кавитационные процессы, происходящие во время ЭГИО, могут внести существенный вклад в изменение структуры жидкого металла за счет диссипации значительного количества энергии.

Совокупность пузырьков, которые находятся в поле падающей и рассеянных волн, во время вынужденных колебаний частично переизлучают падающую волну, образуя поле многократного рассеяния, которое вызывает поглощение акустической волны. Таким образом, каждый из пузырьков находится в поле как падающей, так и рассеянных волн. Затухание акустической волны происходит по закону

$$P_m = P_{m0} \cdot e^{-\alpha_{\text{кав}} \cdot x}, \quad (10)$$

где  $\alpha_{\text{кав}}$  – коэффициент поглощения энергии звуковой волны в кавитирующей среде;  $P_m, P_{m0}$  – давления до поглощения и после него на расстоянии  $x$  соответственно.

В работе [16] коэффициент поглощения в кавитационном облаке предложено оценивать, исходя из уравнения для закона сохранения энергии. В одномерном случае при наличии плоской бегущей волны, учитывая выражение (10), это уравнение будет иметь вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} \rho \cdot b \cdot R^3 \cdot \dot{R}^2 \right) = \frac{\alpha_{\text{кав}} \cdot P_m^2}{\rho \cdot c}, \quad (11)$$

где  $R$  – радиус пузырька;  $b$  – акустическая жесткость среды.

Радиус кавитационного пузырька в акустическом поле определим с помощью уравнения Рэлея-Плессета [15]

$$R\ddot{R} + \frac{3\dot{R}^2}{2} = \frac{1}{\rho} \left( P_g - P_0 - P(t) - \frac{2\sigma}{R} - 4 \frac{\mu\dot{R}}{R} \right) = 0, \quad (12)$$

где  $P(t)$  – давление в расплаве, генерируемое во время обработки;  $\mu$  – кинематическая вязкость;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкого алюминия.

Для обеих стадий разрядного импульса получены спектры радиальных колебаний кавитационного пузырька (рис. 4).

Оценочные коэффициенты поглощения в кавитирующем облаке в соответствии с выражением (12) равны  $\alpha_{\text{кав}}^{\text{вкд}} = 3,75 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^{-1}$  (для стадии выделения энергии в канале разряда) и  $\alpha_{\text{кав}}^{\text{птг}} = 6,52 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^{-1}$  (для стадии пульсации парогазовой полости). Если сравнивать эти значения с расчетным коэффициентом поглощения за счет вязкости и теплопроводности при отсутствии кавитационных процессов (который в среднем составляет  $2,5 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^{-1}$ ), несложно заметить, что в кавитационном облаке поглощение происходит более интенсивно.

Определим количество энергии, диссипирующей за один разрядный импульс ЭГИО для каждого из механизмов поглощения на расстоянии 20 мм от торца волновода.

Для определения энергии, диссипирующей в расплав за счет вязкости среды с коэффициентом поглощения (6), проинтегрируем спектры на всем диапазоне частот до и после поглощения.

$$\varepsilon_B = \left[ \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \Phi_0(\omega) d\omega - \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \Phi(\omega) d\omega \right]_{\text{вкд}} + \left[ \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \Phi_0(\omega) d\omega - \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \Phi(\omega) d\omega \right]_{\text{птг}}, \quad (13)$$

где  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$  – максимальная и минимальная круговая частота соответственно для каждой стадии разрядного импульса.

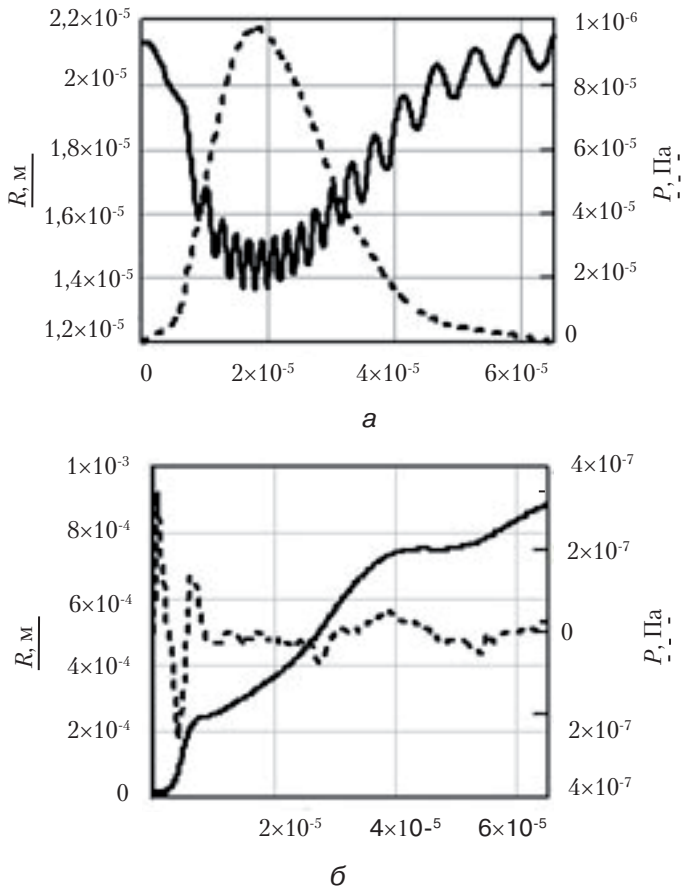


Рис. 4. Динамика зародышевого кавитационного пузырька в акустическом поле: а – на стадии выделения энергии в канале разряда; б – на стадии пульсации парогазовой полости

Аналогично определяются энергии (таблица), которые диссипировали при отражении от стенок формы с применением коэффициента поглощения (8) и в кавитационном облаке с использованием найденных оценочных коэффициентов поглощения по уравнению (11).

Из полученных данных следует, что наибольшая диссипация энергии имеет место в кавитационном облаке. Сравнение энергии, диссипировавшей за один разрядный импульс с энергией связи для атомов алюминия, полученной разными авторами

**Энергии, диссипирующие в расплав**

Явление	Диссипирующая энергия		Энергия связи атомов алюминия кДж/моль
	Дж/кг	Дж/моль	
Вязкость и теплопроводность	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-7}$	326,4 [18] 318 [19]
Отражение от стенок формы	0,05	$1,36 \cdot 10^{-3}$	
Кавитационные процессы	$1,07 \cdot 10^4$	$2,89 \cdot 10^2$	

[20, 21], указывает на то, что при определенном количестве разрядных импульсов, переданных в расплав, уровень энергетического насыщения приближается к энергии межатомной связи алюминия и может вызвать изменения в структуре жидкого алюминия.

### Выводы

• Проведенный анализ показал, что основным фактором, влияющим на диссипацию энергии в расплаве, а, следовательно, на структурные преобразования в нем, является степень развитости кавитации.

• Сравнение уровня энергии диссипации при ЭГИО с энергией межатомной связи в жидком алюминии указывает на возможность влияния энергии, диссипировавшей при ЭГИО, на структуру жидкого алюминия за относительно небольшое время обработки. Изменение структуры жидкого металла, в свою очередь, может изменить диссипативные свойства среды и привести к более интенсивной диссипации подводимой акустической энергии в расплаве.



### Список литературы

1. Эскин Г. И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. – М.: Металлургия, 1965. – 224 с.
2. Долматов А.В. Влияние обработки алюминиевых расплавов упругими низкочастотными колебаниями на структуру и свойства литого металла: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Екатеринбург, 2006. – 139 с.
3. Грабовий 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. – Киев, 2007. – 42 с.
4. Цуркин В. Н., Грабовий В. М., Синчук А. В. Функциональные возможности ЭГИ обработки в ковше // Электронная обработка материалов. – 2006. – № 5. – С. 55-61.
5. Куклин В. М. Роль поглощения и диссипации энергии в формировании пространственных нелинейных структур в неравновесных средах: Обзор // Украинский физ. журнал. – 2004. – Т. 1, №1. – С. 49-81
6. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин и др. – М.: Наука, 1994. – 382 с.
7. Васин М. Г., Ладьянов В. И. Полиморфные переходы в однокомпонентных жидкостях. Экспериментальные данные // Вестник удмуртского ун-та. Физика. – 2005. – № 4, Ч. 1. – С. 99-116
8. Кернер Б. С., Осипов В. В. Стохастически неоднородные структуры в неравновесных системах // ЖЭТФ. – 1980. – Т. 79. – С. 2218-2222.
9. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. – М.: Наука, 2008. – 272 с.
10. Кривицкий Е. В., Шамко В. В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – Киев: Наук. думка, 1979. – 201 с.
11. 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.
12. Цуркин В. Н., Мельник А. В., Грабовий В. М. Анализ спектральных характеристик электро-разрядного генератора упругих колебаний // Збірник наукових праць НУК. – 2005. – № 2 (401). – С. 112-117.
13. Шульце Г., Михайлов И. Г. Металлофизика. – М.: Мир, 1971. – 503 с.
14. Гитис М. В., Михайлов И. Г. Распространение звука в жидких металлах: Обзор // Акустический журнал. – 1966. – Т. 12, № 2. – С. 145-159.
15. Гитис М. В., Михайлов И. Г. К расчету скорости звука в жидких металлах // Там же. – 1967. – № 4, Т. 3. – С. 556-561.

## Получение и обработка расплавов

16. Моделирование процесса формирования кавитационной области в высоковязких и высокодисперсных средах / Р. Н. Голых, В. Н. Хмелев, С. С. Хмелев и др. // Вести высших учебных заведений чернометаллургии. – 2010. – № 4 (22). – С. 34-41.
17. Червяков В. М., Коптев А. А. Определение энергозатрат в роторных аппаратах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 10-12.
18. Стебновский С. В. Условия формирования пузырьковых суспензий при ударно-волновом нагружении жидкостей // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 2. – С. 53-63.
19. Червяков В. М., Ондолько В. Г. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах. – М.: Машиностроение. – 2008. – 64 с.
20. Василиу Е. В. Трехионные взаимодействия и структура жидких металлов // Труды Одесского политехн. ун-та. – 2001. – Вып. 1. – С. 24-31.
21. Энергия связи, фоновые спектры и термодинамические свойства элементов со структурами A1, A2, A3, A4 – Al, Cu, V, Ti, Mg, Si, Sn / Н. Н. Сирота, И. М. Сирота, Т. М. Сошнина и др. // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 3, вып. 9 – С.1 674-1679.

Поступила 05.12.2013

### **ВНИМАНИЕ!**

**Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.**

**Стоимость заказного номера - 4000 грн.**

### **Расценки на размещение рекламы (цены приведены в гривнях)**

Размещение	Рекламная площадь	Стоимость, грн.
<b>Рекламные блоки в текстовой части журнала</b>		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
<b>Цветная реклама на обложке</b>		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

**При повторном размещении рекламы - скидка 15 %**

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев- ГСП. Вернадского, 34/1**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

**телефоны: (044) 424-04-10, 424-34-50**

**факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua**