



### Список литературы

1. Цветное литье: Справочник / Н. М. Галдин, Д. Ф. Чернега, Д. Ф. Иванчук и др. / Под ред. Н. М. Галдина. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.
2. Производство стальных отливок: Учебник для вузов / Л. Я. Козлов, В. М. Колокольцев, К. Н. Вдовин и др. / Под ред. Л. Я. Козлова. – М.: МИСИС, 2003. – 352 с.
3. Волков В. Б. Понятный самоучитель Excel 2010. – СПб.: Питер, 2010. – 256 с.
4. Microsoft Excel 2010 для квалифицированного пользователя: Учебное пособие. – М.: Академия Айти, 2011. – 244 с.
5. Данилин Г. А., Куризна В. М., Курзин П. А. Математическое программирование с Excel: Учебное пособие для всех специальностей МГУЛа. – М.: МГУЛ, 2005. – 113 с.

Поступила 21.11.2012

УДК 669.18

**В. Б. Охотский**

Государственная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

### **ПАРОФАЗНАЯ ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ МЕТАЛЛА. ГИДРОДИНАМИКА**

*Рассмотрены гидродинамические процессы в зоне взаимодействия газопорошковых струй магния и кальция с металлом.*

**Ключевые слова:** магний, кальций, десульфурация, металл.

*Розглянуто гідродинамічні процеси в зоні взаємодії газопорошкових струменів магнію та кальцію з металом.*

**Ключові слова:** магній, кальцій, десульфурация, метал.

*Hydrodynamical processes in the zone of magnesium and calcium gas-powder jets interaction with metal.*

**Keywords:** magnesium, calcium, desulphuration, metal.

#### *1. История и состояние вопроса*

Появление технологий производства стали в жидком состоянии и ее разлива сопровождалось ликвацией и сегрегацией элементов в стальном слитке, снижающих качество проката. Наиболее отрицательно влияние серы, что заставило еще в 1890-х годах исследовать возможности десульфурации чугуна и стали оксидами, карбонатами, карбидами, цианидами и хлоридами щелочных и щелочноземельных

металлов. Некоторые из них используются и сегодня, но постепенно сформировались (как ведущие) десульфуризирующие чугуны магнием и стали – кальцием.

В 1949-1950 г. г. исследовали вдувание магния в чугун (США), которое получило промышленное развитие в 1960-х годах [1]. В 1970 г. фирма Cast Iron&Pipe Corp. (США) предложила для десульфурации магнезит, а в 1986 г. SOLLAC (Франция) использовала для этого порошковую проволоку (ПП) с магнием. Динамика производства П в мире магния в 1960-2010 г. г. описывается зависимостью, т/год

$$\lg \Pi = 0,015 \Gamma - 24,32, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  – год. В середине 1990-х годов на десульфурацию чугуна расходовали до 17 % производимого магния.

На первой Electric Furnace Conference (США) в 1943 г. сообщалось об успешном использовании силикокальция для обработки стали. В 1961 г. в Великобритании были проведены эксперименты по вдуванию силикокальция в сталь для ее десульфурации, в том числе в смеси с известью, добавками магния и алюминия. В 1975 г. Pfizer Inc (США) для ввода силикокальция в сталь использовала порошковую проволоку (ПП), поступавшую в ковшовую ванну через погруженную фурму. Сегодня все три технологии ввода силикокальция в сталь используются не только при ее десульфурации, но и раскислении, модифицировании неметаллических включений [2].

Наибольшее распространение получили технологии вдувания порошков магния и кальция и ввода их с ПП благодаря управлению процессом и действию перемешивающего металла образующимися парами десульфуратора.

Ниже, в разделах 2 и 3, приведены выражения, полученные на основании теории волнового взаимодействия в газожидкостных системах. Они могут быть использованы при выражении входящих в них параметров в любой одной из существующих систем единиц.

### 2. Образование и дробление пузырей

Во всех технологиях парофазной десульфурации металла образуются и всплывают пузыри размером  $D$ , содержащие пары магния или кальция, которые могут дробиться в капиллярном режиме или режиме ускорения волн [3].

В капиллярном режиме дробления капиллярная волна длиной  $\lambda_\sigma$  с минимальной продолжительностью роста амплитуды  $\alpha_\sigma$  до величины  $\alpha_\sigma \approx \lambda_\sigma$  успеваает вырасти прежде, чем пройдет по наветренной стороне пузыря длиной действию  $\pi D/4$  со скоростью движения капиллярной волны. Используя из этого условия закономерности поведения капиллярных волн [3], определим, что дробление пузыря прекратится при достижении им размера

$$D_\sigma = (2^6 \sigma_1 / 3\pi\beta_\sigma \rho_1 g)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\rho_1$  – поверхностное натяжение и плотность металла;  $\beta_\sigma = 0,3$  [4];  $g$  – гравитационное ускорение.

Дробление пузыря в режиме волн ускорения происходит, если волна ускорения длиной  $\lambda_a$  с минимальной продолжительностью роста амплитуды  $\alpha_a$  до величины  $\alpha_a \approx \lambda_a$  достигнет этого раньше, чем пройдет со скоростью волны ускорения по диаметру пузыря. Используя выражения для закономерностей поведения волн ускорения [5], получим, что дробление прекратится, когда пузырь достигнет размера

$$D_a = (2^{12} C_D^{3/2} \cos^3 \theta \eta_1^2 / 3^2 \pi^{3/2} \beta_\alpha^{5/2} n^{1/2} \rho_1 \rho_r g)^{1/3}, \quad (3)$$

где  $C_D \approx 1$ ,  $\beta_\alpha \approx 1$  [4];  $\theta$  – угол между осью пузыря и вертикалью;  $n$  – отношение давлений в скачке уплотнения;  $\rho_r$  – плотность газа в пузыре.

3. Динамика частиц и капель

Анализ литературных данных о размере  $d_p$  используемых частиц магния (27 случаев) и кальция (14 случаев) показал, что наиболее часто он составляет 0,3-1,5 и < 0,1-0,7 мм соответственно. Отношение массового  $G$  (кг/мин) и объемного  $I$  (м<sup>3</sup>/мин) расходов для магния (30 случаев) и кальция (16 случаев) соответственно в 44 и 33 % случаев составляет  $\leq 10$  кг/м<sup>3</sup>, в 19 и 16 % – 10-20 кг/м<sup>3</sup>, а в дальнейшем плавно снижается. Величина безразмерного комплекса  $K_p \equiv \rho_p d_p / \rho d$ , где  $\rho_p, \rho$  – плотность частицы магния (3 случая), составляет 8-72 (ср. 38), для кальция (9 случаев) – 2-13 (ср. 64), а рассчитанные по работе [3] величины показателя трения  $f$ , соответственно, 0,045-0,02 (ср. 0,0109) и 0,0046-0,0360 (ср. 0,0180). Наиболее часто встречаются отношения массовых расходов частиц и газа  $x = 10$  при этом коэффициент турбулентной структуры струи, несущей дисперсную фазу, составляет  $a = 0,03$ , а длина ее начального участка – около 16. Частицы магния достигают 0,54-0,89 скорости несущего газа, а кальция – 0,71-0,75. При обычной скорости газа на выходе из сопла 40-300 м/с этого достаточно для внедрения частицы в металл на глубину  $L$ , равную, по крайней мере, ее диаметру  $L \geq d_p$  для крупных частиц размером более 1 мм, но иногда не достаточно для мелких частиц  $d_p \leq 0,1$  мм [3].

Частица десульфуратора  $d_p$ , погрузившись в металл, испаряется и превращается в пузырь размером  $D_p = d_p (\nu T_1 p_p K_d / M_d \cdot 273 \cdot 100)^{1/3}$ , где  $\nu$  – мольный объем газа;  $T_1$  – температура металла;  $M_d$  – мольная масса десульфуратора;  $K_d$  – его концентрация в сплаве частицы, %. Однако, образование отдельных пузырей из каждой частицы возможно, если расстояние между ними достаточно велико, чтобы предотвратить контакт образующихся пузырей, что обеспечивается при

$$G/J \leq 100 M_d / K_d \nu. \tag{4}$$

На рис. 1 эта зависимость представлена линией I, которая в большинстве случаев находится ниже фактических соотношений (точки), и, следовательно, пузыри размером  $D_p$ , образующиеся от отдельных частиц, сливаются. Только в первых опытах по вдуванию магния в чугун [6] в 1949-1950 г. г. отношение  $G/J$  составляло 0,03-0,05 кг/м<sup>3</sup>, что близко к выполнению условия (3). Сегодняшняя промышленная интенсивность продувки больше на порядок величины и, несмотря на гидродинамическую обеспеченность, возможности внедрения каждой отдельной частицы в металл образующиеся из них парофазные пузыри могут сливаться в один пузырь размером

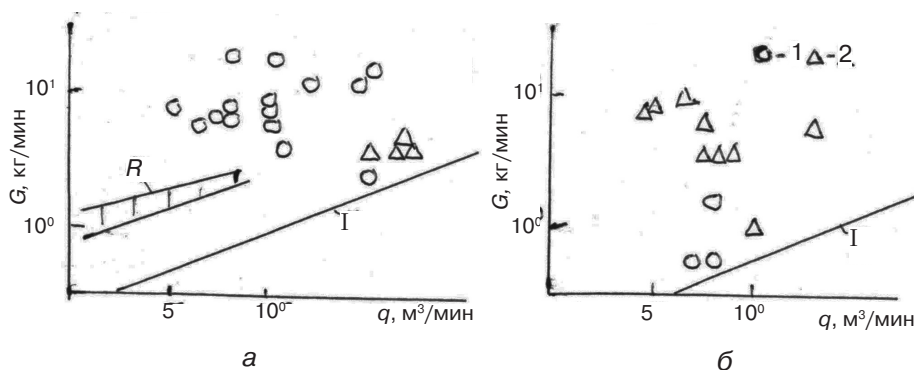


Рис. 1. Условия существования пузырей, образовавшихся при испарении отдельных частиц магния (а) и кальция (б): 1, 2 – отечественные и зарубежные данные

## Получение и обработка расплавов

$D_v = k_D (Gv/M_d + J)^{2/5} (T_1/273)^{1/3} g^{1/5}$ , где  $k_D = 1,1835$  [3]. Однако эти пузыри дробятся. Наиболее близко к линии подходят отечественные и зарубежные данные, в том числе рекомендации фирмы Remasog (США) (область  $R$  на рис. 1, а), ведущего производителя технологии и дутьевых устройств для десульфурации чугуна магнием, в том числе в ковшах миксерного типа [7].

На рис. 2 линиями I и II представлены размеры частиц, отвечающие равенству  $D_p = D_\sigma$  (1) и  $D_p = D_\alpha$  (2), сопоставленные с фактическими (точки) для вдувания магния (рис. 2, а) и кальция (рис. 2, б), в зависимости от содержания десульфуратора в сплаве частицы. По-видимому, выбор величины  $d_p$  на практике должен осуществляться, исходя из этого условия, что обеспечивает стабильность усвоения десульфуратора независимо от условий усвоения частиц в зоне взаимодействия газопорошковой струи с металлом. В отечественной и зарубежной практике разницы в решении этого вопроса не замечено.

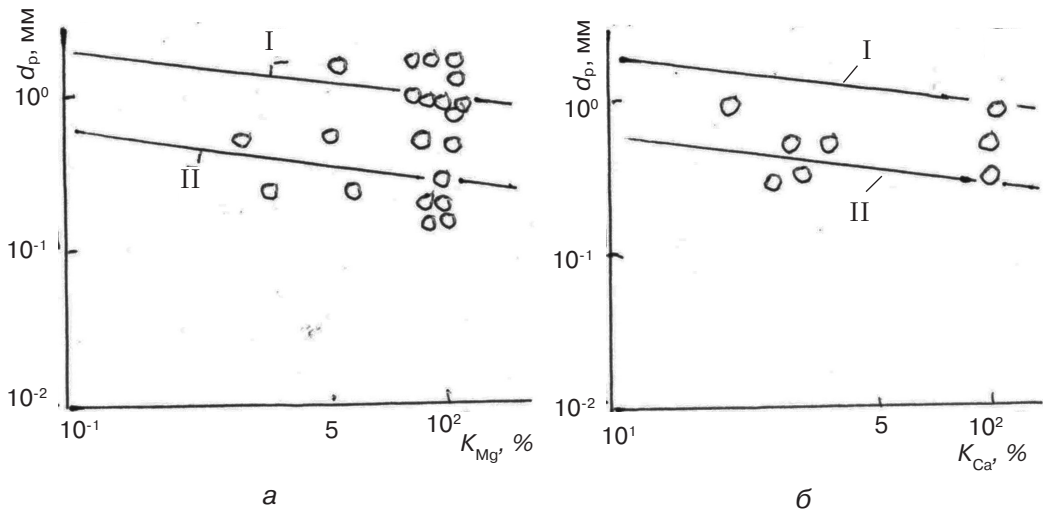


Рис. 2. Условия равенства размеров пузырей от дробления и испарения частиц магния (а) и кальция (б)

Газовый поток с объемным расходом  $J$  набегаёт на переднюю точку образующегося пузыря, разворачивается в пределах зоны диаметра  $d$  и обтекает поверхность пузыря в режиме потенциального течения со скоростью  $w$ , равной скорости истечения из сопла. В результате на поверхности контакта газ-металл формируются капиллярные волны длиной  $\lambda$ , амплитуда которых  $\alpha$  растёт во времени по закономерностям [4], и при достижении условия  $\alpha \approx \lambda$  от поверхности пузыря отрывается тороид металла, разрушающийся на капли размера  $\lambda$ . Этот процесс начинается по периметру зоны удара диаметра  $d$  и из условия, что за время прохождения газовым потоком  $\tau_{gb} = d/2w$  волна с наименьшей продолжительностью роста успевает вырасти по амплитуде до  $\alpha \approx \lambda$ , при этом получим условие образования этих капель размера  $\lambda_n$

$$d \leq (3^3 \beta_\sigma^4 \rho^4 q^5 / 2^6 \pi^5 \eta_1 \rho_1 \sigma_1^2)^{1/7}, \quad (4)$$

где  $q = J/n_c$ ;  $n_c$  – число сопел в фурме.

Образование капель заканчивается при условии, что продолжительность оббега потока полупериметра пузыря  $\tau_{gb} = \pi d/2w$  также равна продолжительности роста капель, но уже из волны длиной  $\lambda_k$ , что будет иметь место при условии

$$d \leq (3^3 k_D^3 \beta_\sigma^4 q^{31/5} / 2^6 \pi^2 \eta_1 \rho_1 \sigma_1^2 g^{3/5})^{1/10}. \quad (5)$$

С образованием капель размера  $\lambda_k$  в обоих случаях размер образующихся капель будет

$$\lambda = (2^{12} \pi^7 \eta_1^2 \sigma_1 d^8 / 2^8 \beta_\sigma^2 p_1 \rho^2 q_4)^{1/3}. \quad (6)$$

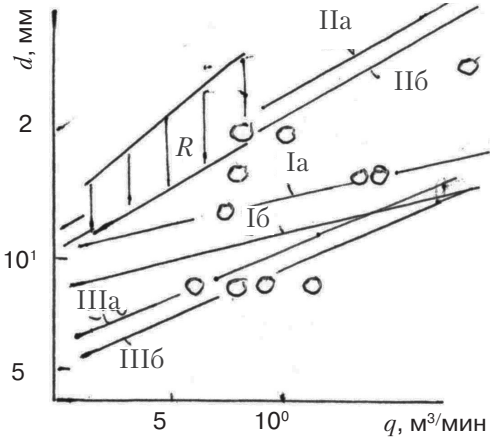


Рис. 3. Условия диспергирования металла в зоне взаимодействия с ним вдуваемого газа

На рис. 3 для аргона и воздуха зависимость (4) представлена линиями Ia, Ib, а (5) – IIa, IIб, с которыми согласуются отечественные и зарубежные производственные данные (точки), попадающие в область между рассчитанными линиями и ниже их. Рекомендации Remacor Corp. (область R), предотвращающие разбрызгивание металла [7], качественно и количественно отвечают выражению (5).

В соответствии с движением газового потока вдоль поверхности пузыря к соплу инициируемые им капли металла могут залетать в сопло и заметалливать его. Это можно предотвратить, используя достаточно большую скорость газа на выходе из сопла, чтобы отрыв капиллярной волны,

движущейся по границе газ-металл, произошел раньше, чем она достигает края зоны удара диаметра  $d$ . Тогда образовавшаяся капля будет вколочена в металл газовым потоком и не вылетит в сторону сопла. Согласно этому условию необходимо, чтобы

$$w \geq 2^2 (\sigma_1 / 3\beta_\sigma \rho d)^{1/2}, \quad (7)$$

что представлено на рис. 4 линией I. Производственные данные (точки) в большинстве случаев отвечают этому условию. В работе [1] упоминается, что IRSID (Франция) с 1976 г. использовал сверхзвуковую скорость  $W$  для предотвращения заматалливания сопла при вдувании гранулированного магния в чугун. Позже эта технология была освоена при десульфурации стали кальцием фирмами USINOR

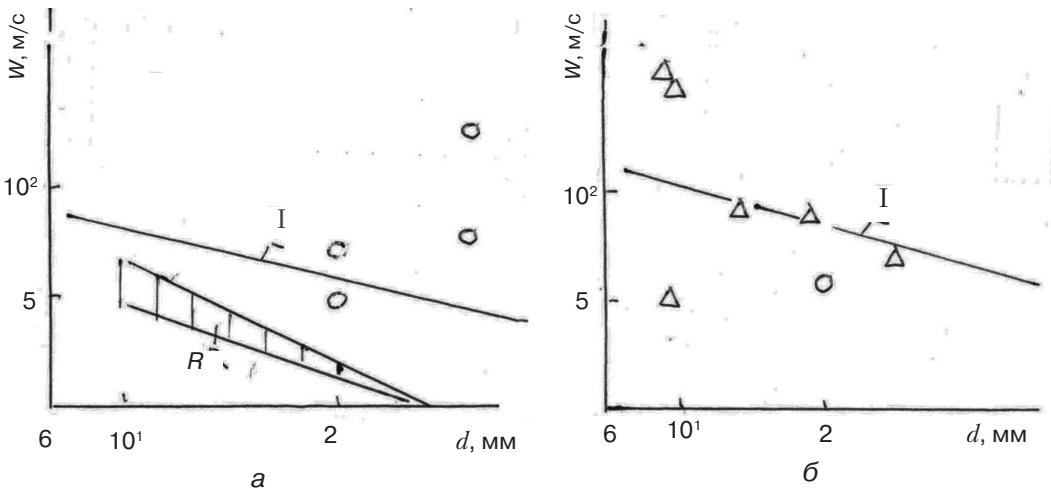


Рис. 4. Условия предотвращения заматалливания сопла при вдувании магния (а) и кальция (б): 1, 2 – отечественные и зарубежные данные

(Франция) [8] и CRM (Бельгия) [9]. На рис. 3 она представлена линиями IIIа при использовании в качестве несущего газа аргона и IIIб – воздуха, на которых расположены экспериментальные данные этих фирм.

Таким образом, проблема заметалливания дутьевых устройств решается двумя разными путями: снижением динамического напора несущего газа, уменьшающим брызгообразование [7], или увеличением его, что препятствует попаданию образующихся капель металла на дутьевое устройство [8-9].

Размеры капель по выражению (6), образующихся в начале обтекания газовым потоком поверхности пузыря (линия I) и в конце его (линия IIа, IIб для аргона и воздуха), на рис. 5 сопоставлены с размерами частиц порошка магния и кальция, которые в большинстве случаев находятся в области между ними. В работе [7] для своих дутьевых устройств считают возможным использовать частицы магния размера 0,18 мм (рис. 5, линия III), что практически совпадает с рассчитанной по выражению (6) линией IIа при вдувании частиц аргоном.

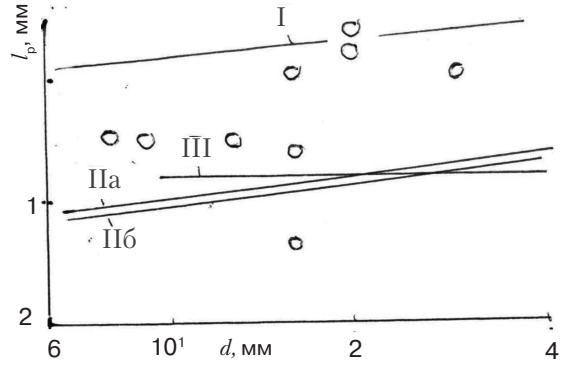


Рис. 5. Сопоставление размеров капель металла и частиц десульфуратора

Массовый расход капель металла, образующихся в зоне взаимодействия из волны длиной  $\lambda$ , составляет  $G_\lambda = \rho_1 \pi d (\pi \lambda^2 / 4) / \tau_\lambda$ , где  $\tau_\lambda$  – продолжительность роста ее амплитуды до  $\alpha \approx \lambda$  [4], а максимально возможная  $\lambda_{max} = d/2$ . Интегрируя величину  $G_\lambda$  для всех длин волн, получим массовую интенсивность образования капель металла в зоне взаимодействия

$$G_k = \pi^{5/2} \beta_\sigma \rho_1^{1/2} p \omega^2 d^{5/2} / 2^{4/3} \sigma_1^{1/2}. \quad (8)$$

Из теплового баланса расхода тепла на нагрев, плавление и испарение частиц десульфуратора и тепла перегрева каплей металла можно найти соотношение массовых расходов  $G$  и  $G_k$ . На рис. 6 они представлены линиями I и II для магния и кальция и сопоставлены с экспериментальными данными, приведенными в литературе. Если для кальция можно предположить, что частицы испаряются в пузыре, то массовый расход магния превышает тепловые возможности поступающих каплей. Более интенсивные разбрызгивания при испарении магния, чем для кальция, заставляют ограничивать расход несущего газа. По-видимому, усвоение магния и кальция металлом происходит в зоне взаимодействия, представляющей собой образующийся пузырь с диспергированными каплями металла, взаимодействующими с частицами десульфуратора, использующими их. В процессе всплывания пузыря идет массообмен паров с серой металла.

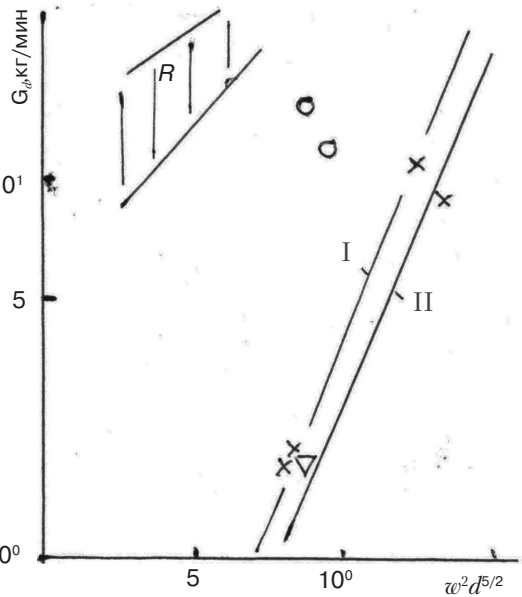


Рис. 6. Сопоставление интенсивностей образования капель и вдувания десульфуратора ( $\omega$ , м/с;  $d$ , мм)

### Выводы

Проанализированы гидродинамические процессы, возникающие при вдувании порошковых магния и кальция в чугун и сталь. Получены выражения, позволяющие определить размеры пузырей, образующихся при парофазной десульфурации металла и условия их дробления, соотношения расходов десульфуратора и несущего газа, условия предотвращения заметалливания сопел.



### Список литературы

1. *Воронова Н. А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Metallurgy, 1980. – 240 с.
2. Обработка стали кальцием: Пер. с англ. / Под ред. Б. И. Медовара. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1989. – 216 с.
3. *Охотский В. Б.* Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.
4. *Mayer E.* // ARS J. – 1961. – V. 31, № 12. – P. 1783-1785.
5. *Adelberg M.* // AIAA J. – 1961. – V. 5, № 8. – P. – 1408-1415.
6. *Kurcinski E. F.* // J&S. Eng. – 1976. – № 4. – P. 59-71.
7. *Янг Дж. Х.* // Сталь. – 2001. – № 4. – С. 22-24.
8. *Дэвид М., Джанно М., Поумен М., Сенанюк Д.* // Инжекционная металлургия. – М.: Металлургия, 1982. – 256 с.
9. *Марике К.* // Инжекционная металлургия. – М.: Металлургия, 1990. – 279 с.

Поступила 15.06.2012

#### **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-142, пр. 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