

В. Л. Найдек, Д. М. Беленький, Н. С. Пионтковская, А. В. Наривский

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Комбинированная обработка алюминиевых сплавов продувкой инертным газом и жидким флюсом\*

*Рассмотрены результаты физического моделирования новой технологии газофлюсового рафинирования алюминиевых сплавов, показаны преимущества разработанного процесса рафинирования.*

**Ключевые слова:** газофлюсовая обработка, расплав, алюминиевые сплавы

Для очистки алюминиевых сплавов от водорода и твердых неметаллических включений применяют различные методы адсорбционного рафинирования: обработку газами, флюсами, фильтрование расплавов. При этом одним методом эффективно дегазируется расплав и в меньшей степени удаляются неметаллические включения (продувка инертными газами), и наоборот (обработка флюсами).

При продувке инертными или нейтральными газами скорость дегазации невелика, так как применяемые для продувки газы (аргон, азот) даже высоких сортов содержат некоторое количество кислорода и водяных паров, которые окисляют алюминий, образуя на поверхности пузырьков оксидные пленки. Такие пленки резко снижают коэффициент диффузии водорода из расплава в пузырек [1, 2] и уменьшают эффективность процесса дегазации.

Поэтому для повышения эффективности удаления из алюминиевых сплавов водорода и неметаллических включений наметилась тенденция применения комбинированных методов рафинирования, в том числе одновременная обработка алюминиевых расплавов инертными газами и флюсами.

Основываясь на опыте продувки жидкой стали смесью газа с порошком извести с целью удаления серы [3], в работе [4] разработали метод рафинирования алюминиевых сплавов смесью азота с тонким порошком криолитсодержащего флюса, которая продувается через расплав. Попадая в расплав, пылевидный флюс оплавляется, покрывает пузырек жидкой солевой пленкой, которая адсорбирует и растворяет оксиды на поверхности пузырька. В результате диффузия водорода из металла в пузырек через пленку жидкого флюса протекает значительно быстрее, чем при наличии плотной оксидной пленки в случае обычной продувки инертным газом. Позднее такой же метод рафинирования был использован в работе [5].

Однако такая технология не получила должного распространения, несмотря на высокую эффективность очистки алюминиевых расплавов от водорода и неметаллических включений при низком расходе флюсов (0,1 % от массы жидкого металла). Это связано, по всей вероятности, как с нестабильной рабо-

той устройства для подготовки газофлюсовой смеси и ввода ее в жидкий металл, так и подготовкой пылевидного флюса, которая является трудоемкой операцией, требующей к тому же соблюдения санитарно-технических норм при работе с вредными фторсодержащими компонентами, входящими в состав флюсов (возможны и другие причины).

Для преодоления указанных недостатков авторами предложен метод газофлюсового рафинирования [6], заключающийся в том, что жидкий флюс замешивают в жидкий металл эжектированием его с поверхности в глубину ванны газовой струей, которая внедряется в расплав из заглубленной в него фурмы со скоростью 60-290 м/с при соотношении диаметра сопла к его длине 0,1:0,3.

Разработке этого метода рафинирования предшествовали исследования на холодной модели, результаты которых изложены в этом сообщении.

В качестве модельных жидкостей применили не смешивающиеся друг в друга воду (алюминий) и подкрашенный бензин (флюс), которые находились в прозрачной цилиндрической емкости диаметром 140 и высотой воды в ней 160 мм. Аргон подавали в жидкость через погруженную вертикально фурму с соплом диаметром 0,5 и длиной 2,5 мм. Расход аргона регулировали через сопло редуктором БКО-50, смонтированным на баллоне, и дросселем, а контролировали ротаметром РМ-0,63 ГУЗ.

С учетом того, что температуры воздуха при градуировке ротаметра и аргона во время моделирования были одинаковыми, расход аргона  $Q_2$  в рабочих условиях рассчитывали по уравнению, приведенному в руководстве по эксплуатации ротаметра

$$Q_2 = 0,85Q_1 \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – расход воздуха при градуировке ротаметра, м<sup>3</sup>/ч;  $P_1$  – давление воздуха при градуировке, равное атмосферному, МПа;  $P_2$  – абсолютное давление аргона перед соплом, МПа.

За взаимодействием газовой струи с жидкостью наблюдали визуально и фиксировали фото- и видеопаратурой.

Когда на поверхности воды бензина нет, газовый

\* По материалам VI Международной научно-практической конференции «Литье-2010», состоявшейся 21-23 апреля 2010 года в Запорожье

факел состоит из основного участка в виде пульсирующей струи конусообразной формы, всплывающего потока пузырьков аргона разного диаметра (максимальный размер пузырьков 3,5 мм) и барботажной зоны на поверхности жидкости (рис. 1, а). Если на

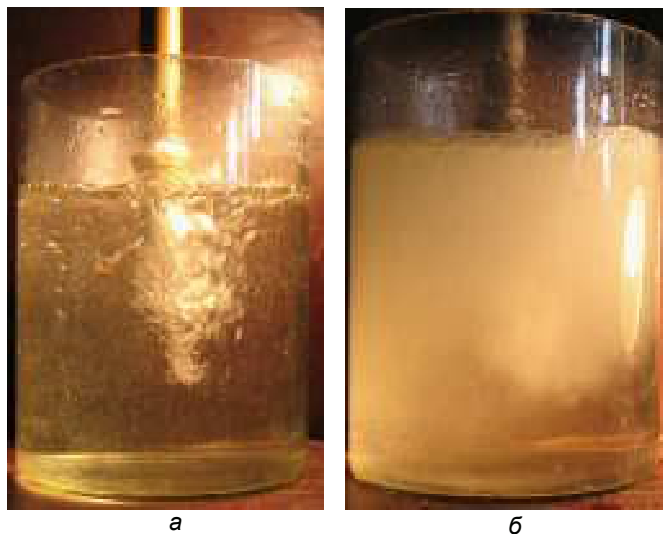


Рис. 1. Продувка ванны аргоном

поверхности воды находится бензин, картина резко меняется: при определенном расходе аргона в конце основного участка струи появляется множество мельчайших пузырьков диаметром 0,2-0,3 мм (рис. 1, б), максимальный размер которых в барботажной зоне уменьшается до 2,5 мм. С увеличением интенсивности дутья мельчайшие пузырьки занимают все большую высоту ванны, постепенно заполняя весь объем (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние расхода аргона при продувке на объем воды, занятый пузырьками**

Расход аргона, л/мин	0,2	0,24	0,4	0,59
Высота воды, занятая эмульсией, %	69	78	81	100

Механизм, объясняющий увеличение дисперсности газовых пузырьков, представляется следующим. Пульсирующий характер истечения струи сопровождается ее периодическим расширением с увеличением угла раскрытия. При взаимодействии с жидкостью контуры струи искажаются, граница раздела газ-жидкость становится неустойчивой и жидкость вовлекается в струю. Во время барботирования жидкости газовыми пузырями на поверхности ванны бензин перемешивается с водой, образуя грубодисперсную эмульсию, которая благодаря кинетической энергии струи эжектируется в глубь ванны. При вовлечении эмульсии в газовую струю образуется высокотурбулентный трехфазный (газ-вода-бензин) поток, состоящий из пузырьков газа разных размеров, пленок бензина и воды.

При столкновении в потоке пленок бензина с пузырьками их поверхность частично или полностью покрывается тонким слоем бензина. Мелкодисперс-

ные пузырьки, скорость всплывания которых невелика, циркуляционными потоками разносятся по всему объему ванны; эта газовая эмульсия существует в течение всего времени продувки. Можно предположить, что такой механизм реализуется и в реальной системе алюминиевый расплав – газ – жидкий флюс. Основным фактором, определяющим массу жидкости в струе, является длина последней [7]. Присоединенную массу жидкости  $m$  рассчитывали по эмпирическому уравнению

$$m = \left[ 3,58 \frac{p_0}{p} \frac{l}{d} - 36,6 \frac{p_0}{p} \right] m_r, \quad (2)$$

$m_r$  – массовый расход газа, кг/с;  $p_0$  – давление в окружающей среде, МПа;  $p$  – абсолютное давление газа перед соплом, МПа;  $l$  – длина струи на основном участке, м;  $d$  – диаметр сопла, м.

Для расчета величины  $m$  провели исследования по влиянию параметров продувки на дальность струи, которую определяли по методике [8]. Применительно к вертикальной струе под дальностью понимают расстояние от среза сопла до нижней границы газового факела струи. Результаты исследований сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние параметров продувки на безразмерную дальность струи  $l/d$ , скорость струи на срезе сопла и критерий  $Ar$  (давление аргона на выходе из баллона 0,55 МПа)**

Расход $Q_2$ аргона в рабочих условиях, м <sup>3</sup> /ч, л/мин	0,11 1,8	0,13 2,3	0,14 2,4	0,15 2,6
Давление $P$ аргона перед соплом, МПа	0,14	0,22	0,34	0,52
Длина $l$ струи, мм	84	100	130	154
Скорость струи на срезе сопла, м/с	86	125	176	241
Критерий Архимеда, $Ar$	1695	3564	6958	13184

Безразмерную дальность струи  $l/d$  часто выражают функциональной зависимостью от модифицированного критерия Архимеда [9]

$$\frac{l}{d} = f(Ar) = f\left(\frac{\rho_r \omega^2}{\rho_{ж} g d}\right), \quad (3)$$

где  $\rho_r, \rho_{ж}$  – плотности соответственно газа и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – скорость газа на срезе сопла, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр сопла, м.

Скорость истечения газа на срезе сопла рассчитывается по уравнению

$$\omega = \frac{Q_2 \rho_2}{\rho_1 f}, \quad (4)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – соответственно плотность аргона в нормальных условиях и перед соплом, кг/м<sup>3</sup>;  $f$  – площадь сечения сопла, м<sup>2</sup>.

Плотность аргона в зависимости от давления перед соплом рассчитывали по известному из термодинамики уравнению адиабаты

$$\frac{P_1}{\rho_1^x} = \frac{P_2}{\rho_2^x}, \quad (5)$$

где  $x$  – показатель адиабаты, равный для аргона 1,66;  $\rho_1 = 1,78 \text{ кг/м}^3$  при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$ .

В результате математической обработки результатов экспериментов при  $R = 0,99$  получили зависимость

$$l/d = 11,72Ar^{0,29}. \quad (6)$$

Подставляя в (2) данные из табл. 2, получим зависимость присоединенной массы жидкости от дальности струи аргона (рис. 2)

Например, при дальности  $l/d = 193$  в струю ежесекундно вовлекается 20,5 г жидкости, в том числе 0,1 г/с бензина при его содержании в эмульсии 0,5 %. Расчеты показывают, что если бензин в струе диспергируется до среднего размера частиц 0,1 мм, то каждую секунду образуется ~270 тыс. таких частиц, которые с большей вероятностью могут сталкиваться с мелкодисперсными пузырьками аргона. Вследствии он растекается по их поверхности.

Таким образом, в результате моделирования продувки аргоном ванны с использованием двух несмешивающихся жидкостей, имитирующих металл и флюс, установлено, что верхняя жидкость при определенных условиях эмульгируется в нижнюю, более тяжелую.

Рассмотренный метод обработки по сравнению с

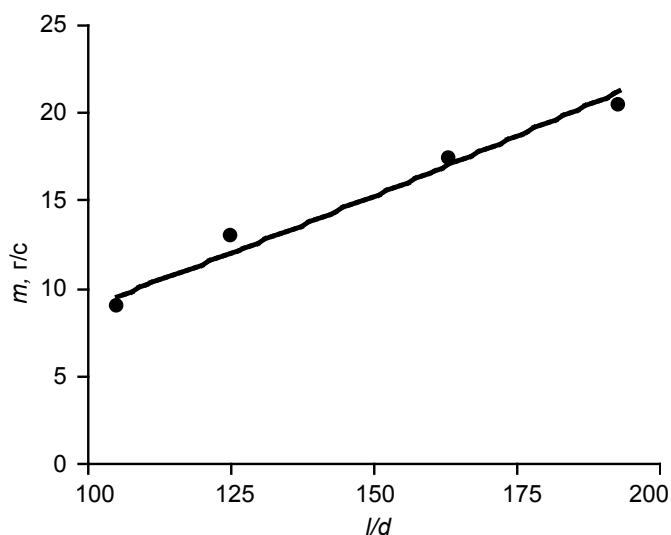
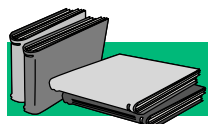


Рис. 2. Влияние дальности струи аргона на присоединенную в струю массу воды

известной обработкой алюминиевых расплавов смесью инертного (или нейтрального) газа и пылевидного флюса позволяет:

- существенно увеличить межфазную поверхность взаимодействия рафинирующих реагентов с обрабатываемым расплавом, что создает реальные предпосылки повышения эффективности удаления водорода и неметаллических включений из жидкого металла, уменьшения продолжительности рафинирования и снижения расхода газа и флюса при рафинировании;

- упростить устройство для ввода флюса в обрабатываемый расплав, сделав его надежным в эксплуатации.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Гудченко А. П. Изучение кинетики изменения газосодержания в алюминиевых сплавах в зависимости от их состава и некоторых методов обработки в жидком состоянии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1952. – 29 с.
2. Улановский Я. Б. О диффузии водорода в гетерогенной системе алюминий – окись алюминия // Технология легких сплавов. – 1971. – № 5. – С. 17-20.
3. Ладыженский Б. И., Башмаков А. Д. Обработка жидких металлов порошком в струе газа. – М.: Металлургия, 1961. – 115 с.
4. Кузьмичев Л. В., Малиновский Р. Р. Рафинирование алюминиевых сплавов продувкой смесью газов с флюсом // Цв. металлы. – 1973. – № 3. – С. 43-45.
5. Колачев Б. А., Тимошкин А. В. Влияние внепечной струйной обработки алюминиевого расплава на газонасыщенность отливок из сплава АК9ч(АЛ4) // Изв. вузов. Цв. металлургия. – 2002. – № 1. – С. 31-32.
6. Пат. № 46165 України. Спосіб рафінування алюмінієвих сплавів / Д. М. Біленький, В. Л. Найдек, Н. С. Піонтковська, А. В. Нарівський. – Опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23.
7. Определение присоединенной массы струи при продувке сверху / В. И. Баптизманский, Ю. С. Паниотов, А. Е. Купчинский, А. Г. Величко // Изв. Вузов. Чер. металлургия. – 1988. – № 2. – С. 20-24.
8. Исследование взаимодействия скоростной газовой струи с расплавом / В. Л. Найдек, Д. М. Беленький, Н. С. Пионтковская, А. В. Наривский // Процессы литья. – 2010. – № 1. – С. 3-6.
9. Марков Б. Л. Методы продувки мартеновской ванны. – М.: Металлургия, 1975. – 279 с.

## Анотація

Найдек В. Л., Беленький Д. М., Пionтковська Н. С., Нарівський А. В.

Комбінована обробка алюмінієвих сплавів продувкою інертним газом та рідким флюсом

Розглянуто результати фізичного моделювання нової технології газофлюсового рафінування алюмінієвих сплавів, показано переваги розробленого процесу рафінування.

## Ключові слова

газофлюсова обробка, розплав, алюмінієві сплави

## Summary

Naydek V., Belen'ky D., Piontkovskaya N., Narivsky A.

The combined processing of aluminum alloys by purging with inert gas and liquid flux

The results of physical modelling of the new technology of gas-flux refining aluminum alloys were considered. The advantages of the developed process of refining are shown.

## Keywords

gas-flux refining, melt, aluminum alloys

Поступила 26.05.10

УДК 621.771

**И. К. Огинский**

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## Смещенный объем при прокатке

Выполнен анализ объемного течения металла, выявлены характерные объемы очага деформации, установлена функциональная взаимосвязь между ними, механизм образования смещенного объема при прокатке, а также проведен анализ взаимосвязей между смещенным объемом и другими характерными (смежными) объемами. Результаты анализа представлены в виде графических зависимостей безразмерных величин. Предложенные закономерности позволяют расширить представление о физической стороне процесса прокатки, взаимосвязях характерных объемов очага деформации. Использование выявленных закономерностей позволяет создать более точные методы расчетов кинематических и энергосиловых параметров прокатки для решения прикладных задач.

**Ключевые слова:** прокатка, параметр, смещенный объем, единичный объем, остаточный объем, угол захвата

Понятие «смещенный объем при прокатке» связывают с именем Финка, его считают основоположником метода определения работы прокатки на основе смещенного объема. Предложенная Финком логарифмическая зависимость была простой по своей структуре и одновременно неточной. Это вызвало необходимость поиска новых решений, известно много работ в этом направлении, их авторы являются: Киссельбах-Гульст, Прейслер, Вейс,

Кирхберг, Герман, Зибель, Грасгоф, Кодрон, Пупе, Виноградов, Гавриленко, Верещагин, Лисс, Петров и др. Появились полуэмпирические зависимости, содержащие всякого рода поправочные коэффициенты, и со временем было утрачено первоначальное физическое значение смещенного объема, которое Финк придавал своей ставшей широко известной формуле. Образовалась группа методов, в основе которых лежат признаки объемного течения металла,