

возрастанию турбулентных течений, что обуславливает рост границы раздела двух фаз и уменьшение размера рабочей зоны. Тем не менее, использование фурмы 5 позволяет проводить обработку при меньших расходах с образованием более глубокой каверны.



Список литературы

1. Милошевич Х. Численное моделирование процесса дожигания монооксида углерода при верхней продувке сталеплавильного конвертера // Теплофизика и аэромеханика. – 1999. – Т. 6, № 2. – С. 283-290.
2. Теплообмен в системе взаимодействия двухфазного газолазерного потока с мишенью / В. П. Лихошва, В. Л. Найдек, Е. А. Рейнталь и др. // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 63-68.
3. Распределение дисперсных частиц в двухфазном газолазерном потоке / В. Л. Найдек, В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь и др. // Металл и литье Украины. – 2009. – № 11-12. – С. 4-7.
4. Моделирование газолазерных потоков при создании оборудования для нагревания дисперсных материалов / В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Ф. И. Кирчу и др. // Там же. – 2009. – № 11-12. – С. 77-81.
5. Лихошва В. П., Рейнталь Е. А., Бондарь Л. А., Угрин Л. Е. Воздействие газовых потоков, подаваемых с помощью фурмы, на жидкие среды // Процессы литья. – 2010. – № 6. – С. 64-71
6. Моделирование процессов формирования суспензионных расплавов / В. П. Лихошва, В. Л. Найдек, Е. А. Рейнталь, и др. // Там же. – 2009. – № 3. – С. 11-15.

Поступила 01.11.2010

УДК 669.714

В. Ф. Сороченко, Д. Ф. Чернега, П. Д. Кудь, В. Н. Рыбак

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ КАРБАМИДА НА СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССАХ РАФИНИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ. Сообщение 1

Предлагается более простая (на основе уравнения прямой с угловым коэффициентом) математическая модель зависимости увеличения содержания водорода в ЛАС АК7 и АК12М2 от количества карбамида, %.

Ключевые слова: карбамид, математическая модель, водород, алюминиевые сплавы.

Пропонується більш проста (на основі рівняння прямої з кутовим коефіцієнтом) математична модель залежності збільшення вмісту водню у ливарних алюмінієвих сплавах АК7 і АК12М2 від кількості карбаміду, %.

Ключові слова: карбамід, математична модель, водень, алюмінієві сплави.

Получение и обработка расплавов

More simple mathematical model of dependence of increase in the maintenance of hydrogen in foundry aluminum alloys AK7 and AK12M2 from quantity of a carbamide, % is offered on the basis of the equation of a straight line with angular factor.

Keywords: carbamide, mathematical model, hydrogen, aluminum alloys.

Как известно [1], при рассмотрении проблемы газопроницаемости первая задача математического моделирования связывается с минимизацией газонасыщения и образованием газоусадочных дефектов отливки. Что касается перспективы управления процессами формирования отливок из литейных алюминиевых сплавов (ЛАС) путем предварительной водородной обработкой расплава, то проведенные в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины исследования показали полезность водородной обработки расплавов ЛАС (объект исследования) независимо от условий питания при затвердевании отливок. При этом акцентировали внимание на обеспечении требуемой рассредоточенной газовой микропористости на основе нужного количества, связанного в твердые газокластерные комплексы молекулярного водорода, снижающего количество растворенного атомарного водорода и ответственного за образование крупных газовых раковин [2].

С целью повышения эффективности рафинирования в качестве источника водорода предложен карбамид ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), существенно влияющий как на структуру, так и на средний размер зерна, например алюминия А7 (рис. 1) [6], в отличие от усложненных и достаточно дорогих способов водородной обработки ЛАС фреоном-12 или смесью азота с фреоном [3, 4] в способе, описанном в работе [5].

Анализ влияния карбамида на микроструктуру алюминия А7 убедительно показывает, что ввод карбамида в количестве $\leq 0,1$ % качественно изменяет не только дендритную структуру исходного алюминия А7 (рис. 1, а, б), но и количественно способствует уменьшению среднего размера его зерна с 700 (без карбамида) до 90-100 мкм (рис. 1, в).

Однако, закономерности влияния карбамида на содержание водорода в процессе рафинирования литейных алюминиевых сплавов, расширяющие возможности его прогнозирования, несмотря на детальные исследования по улучшению структуры и эксплуатационных свойств ЛАС карбамидом [7-9], в настоящее время продолжают оставаться актуальными и перспективными научно-прикладными задачами (предмет исследования).

Работа выполнена согласно плану НИР НТУУ «КПИ» по разработке фундаментальных и прикладных г/б исследований под научным руководством члена-корреспондента НАН Украины, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой ФХОТМ Д. Ф. Чернеги.

Цель работы: обосновать и экспериментально подтвердить линейную зависимость влияния карбамида на содержание водорода в литейных алюминиевых сплавах.

В работе [10] изложены результаты детального исследования влияния при температуре 750 ± 5 °С карбамида в расплаве ЛАС АК7 на содержание в его кристаллическом состоянии водорода. На основании экспериментальных данных авторы с помощью пакета MathCAD получили зависимость содержания водорода $[\text{H}_2]$ ($\text{см}^3/100 \text{ г} = f(x)$) от количества ввода карбамида (x) в ЛАС АК7

$$[\text{H}_2] = y = 0,89 + 1,24 x - 0,33 x^2. \quad (1)$$

Проведенный анализ показал, что выражение (1) – полное квадратное уравнение общего вида, в котором квадратичная функция при значениях коэффициентов

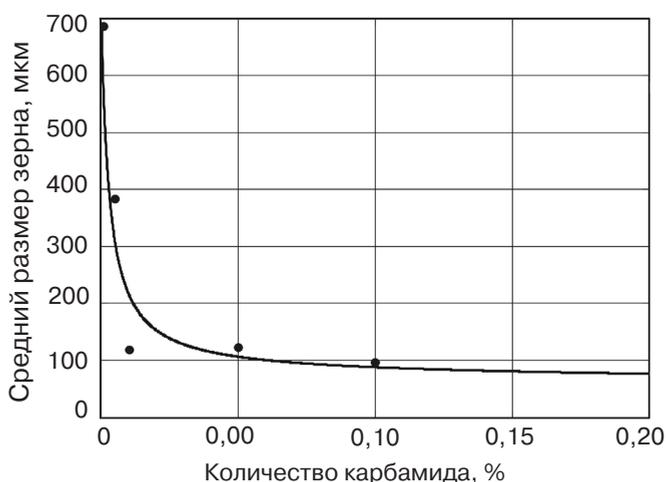
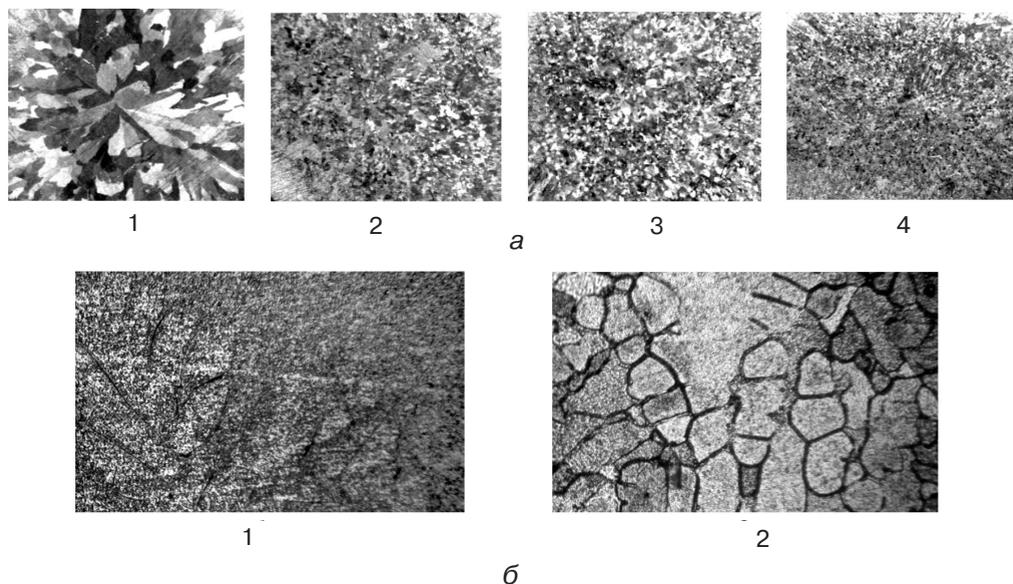


Рис. 1. Влияние содержания карбамида на структуру и среднюю величину зерна алюминия А7: а – макроструктура алюминия А7: 1 – без обработки, после ввода карбамида; 2 – 0,01; 3 – 0,1; 4 – 1,0 %; б – микроструктура алюминия А7: 1 – без обработки; 2 – 0,1 % карбамида; в – зависимость среднего размера зерна алюминия А7 от количества введенного в расплав карбамида, х500

$$a = -0,33 \neq 0 \quad b = 1,24 \neq 0 \quad \text{и} \quad c = 0,89 \neq 0, \quad (2)$$

согласно [11], достигает при $a < 0$ в точке

$$x_{\max} = -\frac{b}{2a} \quad (3)$$

максимума. Подставив из формулы (3) значения $a = -0,33 \neq 0$ $b = 1,24 \neq 0$ в (3), находим величину критического значения x_{\max} на оси абсцисс

$$x_{\max} = -\frac{1,24}{2(-0,33)} = 1,87. \quad (4)$$

Получение и обработка расплавов

Так как содержание водорода (1) в ЛАС зависит от фактора экстенсивности – массы x (%), введенного в расплав карбамида, то для упрощения зависимости (1) целесообразно воспользоваться средним значением \bar{x} аргумента на числовом отрезке $[x = 0, x_{\max} = 1,87]$

$$\bar{x} = \frac{x_{\max} - x_0}{2} \quad (5)$$

или с учетом (3)

$$\bar{x} = \frac{x_{\max}}{2} = -\frac{b}{4a} \quad (6)$$

Вычисляем производную $y' = f'(\bar{x})$ функции (1) при $x = \bar{x}$

$$y' = -0,66\bar{x} + 1,24 \quad (7)$$

или (с учетом $\bar{x} = -\frac{b}{4a}$)

$$y' = -0,66 \left(-\frac{b}{4a}\right) + 1,24 = \frac{0,66b}{4a} + 1,24. \quad (8)$$

Полученная производная $y' = f'(\bar{x})$ равна тангенсу угла, образованному положительным (в сторону возрастания) направлением оси («содержание карбамида, %) и положительным направлением касательной, проведенной к графику этой функции в точке при заданном значении \bar{x}

$$y' = \operatorname{tg} \bar{a}. \quad (9)$$

Принимаем величину тангенса угла постоянной и равной угловому коэффициенту \bar{k}

$$\operatorname{tg} \bar{a} = \bar{k}. \quad (10)$$

На основании уравнений (8) – (10) составляем новое равенство

$$\bar{k} = y' \quad (11)$$

или

$$\bar{k} = -\frac{0,66b}{4a} + 1,24. \quad (12)$$

Подставив из (1) значения $a = -0,33$ и $b = 1,24$, находим численное значение коэффициента \bar{k} в точке \bar{x}

$$\bar{k} = -\frac{0,66 \cdot 1,24}{4 \cdot 0,33} + 1,24 = 0,62. \quad (13)$$

В развитие (1) напишем уточненную искомую зависимость влияния карбамида на

содержание водорода в ЛАС в виде уравнения прямой с угловым коэффициентом \bar{k} в интервале значений $[x = 0,2; x_{\max}]$

$$y = \bar{k}x + c_i, \quad (14)$$

где \bar{k} – угловой коэффициент прямой; c_i – отрезки, отсекаемые на оси ординат, включающие поправки Δc_i^0

$$c_i = c_i^0 + \Delta c_i^0, \quad (15)$$

где c_i^0 – содержание водорода в исходном ЛАС; Δc_i^0 – поправки на нелинейное

влияние в интервале 0-0,2 % содержания карбамида на изменение содержания водорода в ЛАС.

Экспериментально установили, что в границах ошибки проведения эксперимента ($\pm 0,15 \text{ см}^3/100 \text{ г}$) [9] ввод до 0,2 % карбамида ($\leq 10\%$ от $x_{\max} = 1,87\%$) практически не приводит к существенным изменениям содержания водорода в расплавах ЛАС АК7, АК12М2 ($\Delta c_{1,2}^0 = 0,15$) и АК12М2 + 0,5 % Mg и 0,1 % Ti ($\Delta c_3^0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$).

Алюминиево-кремниевый сплав АК12М2 расплавляли в тигельной печи сопротивления типа СШОЛ-11,6/12-М6 с чугунным тиглем с предварительным защитным слоем на основе оксида цинка. В расплав после достижения в нем температуры 1023 К (750 °С) вводили карбамид или карбамид с элементами, образующими гидрид – 0,5 % Mg и 0,1 % Ti. Опытные образцы ЛАС после отстаивания и снятия шлака с поверхности расплава ЛАС отливали в металлический кокиль для дальнейших исследований в них содержания водорода (табл. 1).

Содержание водорода в состоянии кристаллической отливки в системе Al-Si-Mg определяли на установке фирмы «Лесо» и вакуумной установке методом вакуумирования расплавленных образцов ЛАС АК12М2.

Образцы в виде цилиндров диаметром 10 мм и высотой 21 мм для обеспечения требуемого качества их поверхности вытачивали из отливок для механических испытаний.

Образцы после взвешивания на аналитических весах с точностью до четвертого знака загружали в реакционный узел. Последующий их нагрев до плавления осуществляли в печи сопротивления, обеспечивающей стабильную температуру в границах 573-1173 К (300-900 °С). Температуру измеряли хромель-алюмелевой термопарой в комплекте с потенциометром КСП-4. Разрежение создавали форвакуумным насосом ВН-461М и диффузионным насосом ДРН-М. Для отделения водорода от смеси сопутствующих газов применяли палладиевый фильтр, предварительно нагретый до температуры 873-973 К.

Относительное отклонение ($\sigma, \%$) теоретического содержания водорода $[H_2]_{\text{теор}}$ от фактического $[H_2]_{\text{факт}}$ $\text{см}^3/100 \text{ г}$ ЛАС рассчитывали, согласно формуле

$$\sigma = \left| \left(\frac{[H_2]_{\text{теор}}}{[H_2]_{\text{факт}}} - 1 \right) \right| \cdot 100. \quad (16)$$

Величины относительного отклонения (16) вычисляли для А7 [9] и алюминиево-кремниевого сплава АК12М2, химические составы которых, соответствующие ДСТУ 2839-94 (Украина) или сертификату ЛАС, приведены в табл. 2.

Из табл. 1 видно, что относительные отклонения от фактических (σ) теоретических величин линейной зависимости содержания водорода в А7 и ЛАС АК12М2 не превышают величины $\sigma \leq 10\%$. Дальнейшие исследования влияния увеличения

Получение и обработка расплавов

Таблица 1. Теоретические и экспериментальные результаты

ЛАС (состав)	CO(NH ₂) ₂ , %	Содержание водорода в ЛАС, см ³ /100 г			
		факти- ческое	теорети- ческое	% откло- нения, σ	известная [9] экстенсивная зависимость [H ₂] = y = 0,89 + + 1,24 x - - 0,33 x ²
AK7 + +CO(NH ₂) ₂ , [9]	0	0,81 [9]	0,96	-	предложенные в границах [x = 0,2; x = x _{max}] y = kx + c ₁ , где c ₁ = c ₁ ⁰ + Δc ₁ ⁰ при c ₁ ⁰ = 0,81 и Δc ₁ ⁰ = 0,15 c ₁ = 0,81 + 0,15 = 0,96
	0,1	1,04	1,02	2	
	0,2	1,1	1,08	2	
	0,5	1,41	1,27	10	
	0,935	1,75	1,54	12	
	1,0	1,8	1,58	12	
AK12M2 + + CO(NH ₂) ₂	0	0,6	0,75	-	где при c ₂ ⁰ = 0,6 и Δc ₂ ⁰ = 0,15 c ₂ = c ₂ ⁰ + Δc ₂ ⁰ = = 0,6 + 0,15 = 0,75
	0,1	0,75	0,78	4	
	0,2	0,81	0,84	4	
	0,3	0,88	0,90	2	
	0,4	0,93	0,96	3	
	0,5	1,0	1,03	3	
	0,7	1,12	1,15	3	
	0,9	1,21	1,28	5	
AK12M2 + +CO(NH ₂) ₂ + +0,5 % Mg+ +0,1 % Ti	0,0	0,6	0,9	-	где при c ₃ ⁰ = 0,6 и 2Δc ₃ ⁰ = 0,30 c ₃ = c ₃ ⁰ + 2Δc ₃ ⁰ = = 0,6 + 0,3 = 0,9
	0,1	0,9	0,9	0	
	0,2	0,95	1,25	7	
	0,3	0,99	1,09	9	
	0,4	1,08	1,15	6	
	0,5	1,18	1,21	2	

концентрации карбамида на содержание водорода (на примере А7 и ЛАС АК7) показали, что в области исследованных концентраций карбамида 0-5 % также сохраняется практически линейная зависимость повышения содержания водорода от увеличения концентрации карбамида (рис. 2).

Таблица 2. Химический состав алюминия А7 и литейных алюминиевых сплавов АК7 и АК12М2

ЛАС	Содержание элементов, %									Примечание
	Al	Mg	Ti	Si	Mn	Cu	Fe	Zn	Ni	
А7 [9]	основа	-	0,01	0,15	-	0,01	0,16	0,03	-	ДСТУ 11069-2001
АК7	основа	0,2	0,05	6,9	0,23	0,49	0,45	0,05	0,03	ДСТУ 2839-94
АК12М2	основа	0,5*	0,1*	11,8	0,2	1,82	0,45	0,05	0,15	согласно сер- тификату

*Водородная обработка: (0,1-0,5) CO(NH₂)₂ + 0,5 Mg + 0,1 Ti

В дальнейшем планируется разработка физико-химических основ по оптимизации нанотехнологического применения карбамида для расчета оптимального содержания водорода в ЛАС, повышения механических и коррозионных свойств ЛАС.

Выводы

- Предложены поправки, учитывающие нелинейное влияние на содержание водорода в ЛАС карбамида в области его концентраций $\leq 0,2\%$.

- Подтверждено экспериментально с относительным отклонением $\sigma \leq 10\%$ существование предложенной линейной зависимости влияния карбамида в количестве 0-5 % на содержание водорода в алюминии А7, ЛАС (АК7, АК12М2 и АК12М2 с добавками 0,5 % Mg и 0,1 % Ti).

- Перспективна разработка физико-химических основ оптимального применения карбамида для минимального насыщения водородом ЛАС с одновременным повышением их механических и коррозионных свойств.

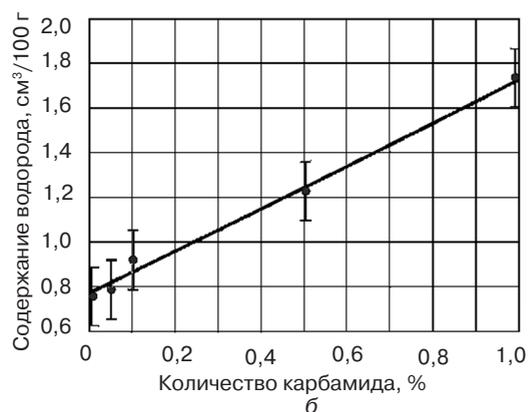
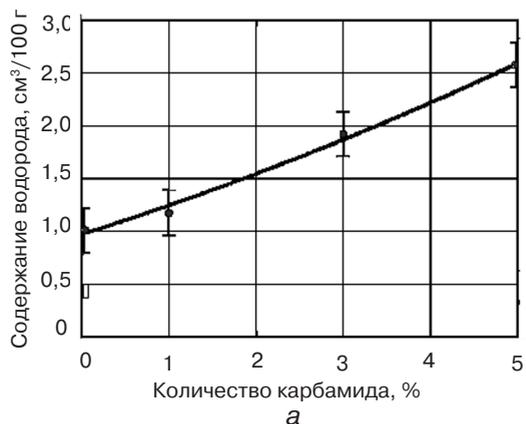


Рис. 2. Влияние карбамида в количестве 0-5 % на содержание водорода: а – в алюминии А7; б – в ЛАС АК7



Список литературы

1. Математическое моделирование управления качеством литья в процессах формирования отливки в песчаной форме / В. П. Кравченко, И. О. Шинский, П. В. Русаков и др. // Процессы литья. – 2006. – № 3. – С. 65-69.
2. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. Перспективы управления процессами формирования отливок из алюминиевых сплавов путем предварительной водородной обработки расплава // Там же. – 2006. – № 3. – С. 41–44.
3. А. с. 1018995 СССР, МКИ С22 В 21/06. Способ рафинирования алюминия и его сплавов / В. К. Афанасьев, Г. Т. Коровин, В. В. Воробьев. – Оpubл. 23.05.83, Бюл. № 19.
4. А. с. СССР, МКИ С 22 В 21/06. Способ рафинирования алюминия и его сплавов / А. Н. Маленьких, В. А. Горбунов, С. В. Голубцов и др. – Оpubл. 23.05.83, Бюл. № 33.
5. Пат. 6503 України, МПК⁷ С 22 В 21/06. Спосіб рафінування алюмінію та його сплавів / Д. Ф. Чернега, В. М. Рибак, В. Ф. Сороченко. – Оpubл. 16.05.2005, Бюл. № 5.
6. Чернега Д. Ф., Рибак В. Н., Сороченко В. Ф. Технология обработки алюминия и литейных алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2004. – № 2. – С. 47-50.
7. Чернега Д. Ф., Рибак В. М. Вплив карбаміду на структуру та властивості алюмінієвих сплавів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2003. – № 3. – С. 82-85.
8. Чернега Д. Ф., Рибак В. М. Вплив органічних речовин на властивості ливарних алюмінієвих сплавів // X Міжнародна науково-практична конференція. – Запоріжжя: ЗПТУ, 2003. – С. 41-43.
9. Рибак В. М. Вплив органічних речовин на властивості ливарних алюмінієвих сплавів // Металознавство та термічна обробка металів. – 2003. – № 1. – С. 38-39.
10. Рибак В. М., Іванченко Д. В. Вплив карбаміду на вміст водню, азоту та вуглецю в алюмінієвому сплаві АК7 // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». – Київ: НТУУ «КПІ» ВПК «Політехніка», 2007. – С. 181-183.
11. Каплан И. А. Практические занятия по высшей математике. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1965. – 575 с.

Поступила 09.12.2010