

Н.Л. Кириллова, А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, С.М. Горбатюк

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ И ОБМАЗКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Аннотация. Для повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность обмазку на основе карбида бора наносили на фурмы с алюминиевым газотермическим покрытием после их термообработки. Дана теоретическая оценка влияния обмазки на основе B_4C на снижение тепловых потерь через воздушные фурмы. Эффективность использования обмазки подтверждена результатами опытно-промышленной проверки на ОАО «НЛМК» и металлографическими исследованиями образцов от фурм после эксплуатации.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, стойкость, тепловые потери, алюминиевое газотермическое покрытие, обмазка на основе карбида бора.

GAS-PRODUCING SHIELDED COATING AND THERMAL COVERING USE TO IMPROVE BLAST FURNACES AIR TUYERS WORK

Abstract. To increase the resistance of the air tuyeres and reduce heat loss through the surface coating on the basis of boron carbide deposited on the tuyeres with aluminum thermal spray coating after heat treatment. Given the theoretical assessment of the impact on the basis of B_4C coating to reduce heat loss through the air tuyeres. Effective use of coating confirmed by pilot testing at OJSC “NLMK” and metallographic examination of samples from tuyeres after operation.

Keywords: blast furnace, air tuyere, resistance, thermal losses, aluminum thermal coatings, coating based on boron carbide.

Воздушные фурмы являются одним из важнейших элементов конструкции доменной печи, определяющих эффективность ее работы; выход фурм из строя влечет за собой необходимость остановки печи для замены разрушенной фурмы. Простои печи по этой причине приводят к существенному снижению выплавки чугуна и увеличению расхода кокса. Кроме того, на воздушные фурмы приходится 30 % всех тепловых потерь в печи. Поэтому проблема повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность является актуальной.

В настоящее время данная проблема решается преимущественно нанесением газотермических покрытий на рабочую поверхность фурмы [1 – 3]. Для дальнейшего повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность целесообразно дополнительно использовать абразивостойкую огнеупорную обмазку на основе карбида бора.

Карбид бора B_4C – уникальное по своим физико-механическим свойствам соединение. Температура плавления карбида бора – 2350 °С. По твердости карбид бора уступает только алмазу. Инструмент из карбида бора может работать при высоких температурах в окислительных средах.

На основе карбида бора в Центральном научно-исследовательском институте технологии машиностроения изготавливают обмазку, не смачиваемую металлом [4, 5].

Обмазку на основе карбида бора B_4C наносили на рабочую поверхность фурмы сверху термообработанного алюминиевого газотермического покрытия.

Оценим влияние обмазки на основе B_4C на снижение тепловых потерь через воздушные фурмы. Рассчитаем тепловые потери для фурмы, на рабочую поверхность которой дополнительно нанесена обмазка на основе B_4C .

Для этого воспользуемся методикой расчета тепловых потерь через воздушную фурму [6]. В работе использованы формулы стационарной теплопроводности для плоской стенки [7].

Тепловой поток через поверхность фурмы:

$$\begin{aligned} Q &= Q_n + Q_p + Q_d = q_n S_n + q_p S_p + q_d S_d = \\ &= K_n (t_r - t_b) S_n + K_p (t_r - t_b) S_p + \\ &\quad + K_d (t_r - t_b) S_d, \text{ Ккал/ч}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Q_n, Q_p, Q_d – тепловой поток через наружный стакан, рьяльную (снаружи и торца) часть фурмы и со стороны дутьевого канала соответственно (рис. 1), Ккал/ч; q_n, q_p, q_d – удельный тепловой поток через наружный стакан, рьяльную часть фурмы и со стороны дутьевого канала соответственно, Ккал/($m^2 \cdot ч$); S_n, S_p, S_d – площадь наружного стакана, рьяльной части фурмы и со стороны дутьевого канала соответственно, m^2 ; K_n, K_p, K_d – коэффициент теплопередачи тепла через наружный стакан, рьяльную часть фурмы и со стороны дутьевого канала соответственно, Ккал/($m^2 \cdot ч \cdot ^\circ C$); t_r, t_d – околофурменная температура в горне и температура горячего дутья соответственно, $^\circ C$; t_b – температура воды в фурме, $^\circ C$.

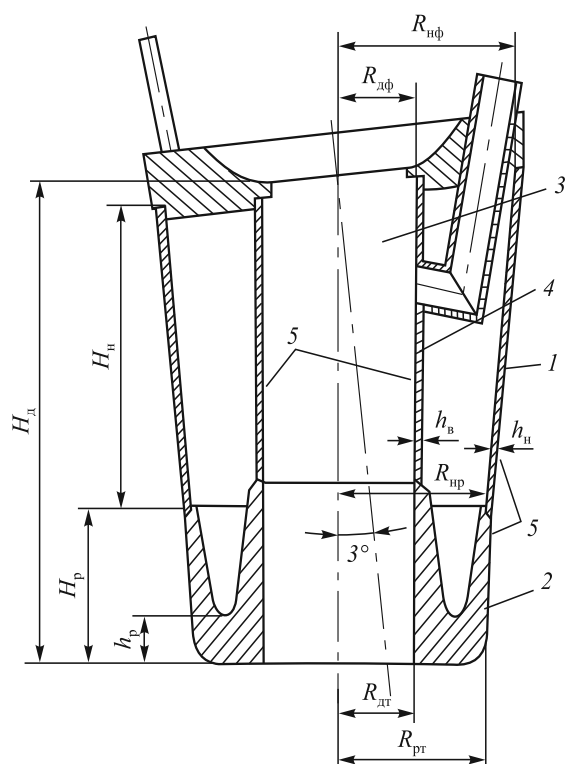


Рис. 1. Продольное сечение воздушной фурмы:
1 – наружный стакан; 2 – рыльная часть; 3 – дутьевой канал;
4 – внутренний стакан; 5 – покрытие

$$K_{\text{H}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{TH}}} + \frac{h_{\text{H}}}{\lambda_{\text{CU}}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{H}}}}, \text{ Ккал/}(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{гн}}$ – коэффициент теплоотдачи наружному стакану со стороны горна, Ккал/(м²·ч·°C); $h_{\text{н}}$, h_i – толщина наружного стакана и i -го материала покрытия соответственно (см. рис. 1), мм; λ_{Cu} , λ_i – коэффициент теплопроводности меди М1 и i -го материала покрытия соответственно, Ккал/(м·ч·°C); m – количество материалов покрытия; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки фурмы к воде, Ккал/(м²·ч·°C).

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{TP}}} + \frac{h_p}{\lambda_{\text{Cu}}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_B}}, \text{ Ккал/}(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{гр}}$ – коэффициент теплоотдачи рыльной части со стороны горна, Ккал/(м²·ч·°C); h_p – толщина торцевой поверхности рыльной части (см. рис. 1), мм.

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{h_b}{\lambda_{Cu}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b}}, K_{\text{кал}}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (4)$$

где α_d – коэффициент теплоотдачи дутьевому каналу от горячего дутья, Ккал/(м²·ч·°C); h_b – толщина внутреннего стакана (см. рис. 1), мм.

$$S_{\mathrm{H}} = 2\pi \frac{R_{\mathrm{hp}} + R_{\mathrm{H}\phi}}{2} H_{\mathrm{H}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{нр}}$ – радиус наружного стакана у рыльной части (см. рис. 1), м; $R_{\text{нф}}$ – радиус наружного стакана у фланца (см. рис. 1), м; $H_{\text{н}}$ – высота наружного стакана (см. рис. 1), м.

$$S_p = \pi(R_{pt}^2 - R_{dt}^2) + 2\pi \frac{R_{pt} + R_{hp}}{2} H_p, \quad (6)$$

где $R_{\text{рт}}$ – радиус рыльной части у торцевой поверхности (см. рис. 1), м; $R_{\text{дт}}$ – радиус дутьевого канала у торцевой поверхности (см. рис. 1), м; H_p – высота рыльной части (см. рис. 1), м.

$$S_{\text{д}} = 2\pi \frac{R_{\text{дТ}} + R_{\text{дФ}}}{2} H_{\text{д}}, \quad (7)$$

где $R_{\text{дф}}$ – радиус дутьевого канала у фланца (см. рис. 1), м;
 $H_{\text{н}}$ – высота дутьевого канала (см. рис. 1), м.

Расчет тепловых потерь через поверхность воздушных фурм был проведен для условий доменной печи (ДП) № 5 ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК).

Принимаем $t_r = 1600\text{ }^\circ\text{C}$; $t_d = 1150\text{ }^\circ\text{C}$; $t_b = 30\text{ }^\circ\text{C}$;
 $h_n = 7,0\text{ мм}$; $h_p = 45,0\text{ мм}$; $h_b = 5,0\text{ мм}$; $h_1 = 1,5\text{ мм}$; $h_2 = 1,0\text{ мм}$;
 $\lambda_{Cu} = 357,4\text{ Ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$; $\lambda_1 = 25,7\text{ Ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$;
 $\lambda_2 = 15,0\text{ Ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$ [8]; $\alpha_{rn} = \alpha_{rp} = 115\text{ Ккал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$;
 $\alpha_d = 360\text{ Ккал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$; $\alpha_b = 5000\text{ Ккал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$;
 $R_{nr} = 154\text{ мм}$; $R_{np} = 185\text{ мм}$; $R_{pt} = 140\text{ мм}$; $R_{dt} = 72,5\text{ мм}$;
 $R_{pb} = 72,5\text{ мм}$; $H_n = 310\text{ мм}$; $H_p = 132\text{ мм}$; $H_b = 440\text{ мм}$.

Первоначально были рассчитаны тепловые потери через поверхность фурмы с термообработанным Al покрытием, которые составили $Q = 159\,991,3$ Ккал/ч.

Для фурмы с дополнительным слоем обмазки вода, охлаждающая фурму, забирает от газов печи тепло (наружная поверхность фурмы).

По формуле (2)

$$K_{\text{H}} = \frac{1}{\frac{1}{115} + \frac{0,007}{357,4} + \frac{0,0015}{25,7} + \frac{0,001}{15,0} + \frac{1}{5000}} = 110,6 \frac{\text{Ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Согласно формуле (5) $S_{\text{н}} = 0,329 \text{ м}^2$; $Q_{\text{н}} = 110,6 \cdot (1600 - 30) \cdot 0,329 = 57\,167,1 \text{ Ккал/ч}$.

По формуле (3)

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{115} + \frac{0,045}{357,4} + \frac{0,0015}{25,7} + \frac{0,001}{15,0} + \frac{1}{5000}} = 109,3 \frac{\text{Ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Согласно формуле (6) $S_p = 0,167 \text{ м}^2$; $Q_p = 109,3 \cdot (1600 - 30) \cdot 0,167 = 28\,590,9 \text{ Ккал/ч}$.

Вода, охлаждающая фурму, забирает от горячего дутья тепло.

По формуле (4) коэффициент теплопередачи тепла

Таблица 1

Характеристики работы воздушных фурм с покрытием и обмазкой

Номер фурмы	Печь	Прибор	Дата установки	Дата снятия	Стойкость, сут.	Причина снятия
358	5	22	17.06.2011	28.09.2011	103	Трещина
373	6	20*	08.06.2011	28.01.2012	234	Трещина

* В экспериментальной фурме, установленной на приборе 20 (ДП № 6), использовали термопару.

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{360} + \frac{0,005}{357,4} + \frac{0,0015}{25,7} + \frac{0,001}{15,0} + \frac{1}{5000}} = 320,8 \frac{\text{Ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Согласно формуле (7) $S_d = 0,2 \text{ м}^2$; $Q_d = 320,8 \cdot (1150 - 30) \cdot 0,2 = 72\,024,4 \text{ Ккал/ч}$.

Общие тепловые потери на экспериментальной фурме согласно формуле (1):

$$Q_{B_4C} = 57\,167,1 + 28\,590,9 + 72\,024,4 = 157\,782,4 \text{ Ккал/ч.}$$

Следовательно дополнительно нанесенная обмазка на основе B_4C дает снижение тепловых потерь на величину

$$\Delta Q = \frac{Q_{Al} - Q_{B_4C}}{Q_{Al}} \cdot 100 \% = \frac{159\,991,3 - 157\,782,4}{159\,991,3} \cdot 100 \% = 1,4 \%$$

В расчетах не учтено изменение $\alpha_{тн} = \alpha_{тр}$ – коэффициентов теплоотдачи от газов горна и α_d – коэффициента теплоотдачи от горячего дутья из-за присутствия обмазки на основе B_4C на рабочей поверхности фурмы.

Общие потери тепла через фурменные приборы при использовании фурм с Al покрытием определяем по формуле

$$Q_{общ} = Q_n = 159\,991,3 \cdot 32 = 5\,119\,721,6 \text{ Ккал/ч}$$

(число работающих воздушных фурм на ДП № 5 – $n = 32$).

Снижение расхода кокса при выплавке 1 т чугуна на ДП № 5 в случае использования фурм с обмазкой на основе B_4C следует ожидать равным:

$$\Delta P = \frac{24 Q_{общ} \Delta Q}{Q_k P_d} = \frac{24 \cdot 5\,119\,721,6 \cdot 0,014}{3499 \cdot 7500} = 0,07 \text{ кг/т,}$$

где Q_k – теплота неполного сгорания кокса, 3499 Ккал/кг (приняли половину от теплоты полного сгорания кокса); P_d – производительность доменной печи.

Экспериментальные воздушные фурмы с покрытием и обмазкой были установлены на ДП № 5 и 6 ОАО «НЛМК» (табл. 1).

Обе фурмы вышли из строя по причине «трещина». Средняя стойкость серийных фурм на ДП № 5,

снятых по причине «трещина», за период эксплуатации фурмы № 358 составила 79 сут, а серийных фурм на ДП № 6, снятых в 2011 г., – 161 сут. Следовательно стойкость экспериментальных фурм превысила стойкость серийных.

Средние значения тепловых потерь, например, за декабрь 2011 г. на фурмах с обмазкой (фурменный прибор 20) и без обмазки (фурменный прибор 19), установленных на ДП № 6, составили 114,7 и 119,0 Мкал/ч соответственно, т.е. экономия тепла составила 3,6 %.

Из снятой фурмы № 373 были вырезаны образцы: 373.1 – верх внутреннего стакана, 373.2 – низ внутреннего стакана, переданные на металлографические исследования.

На всех предоставленных образцах выявлен несплошный диффузионный слой (имеются участки без покрытия, рис. 2). Приповерхностная зона всех проб характеризуется пористой зоной. Толщина диффузионных слоев приведена в табл. 2.

Структура слоя на всех образцах идентична и имеет двухфазное строение: α -фаза (основная составляющая) и эвтектид ($\alpha + \gamma_2$). На всех образцах зона эвтектидной смеси состоит из отдельных единичных участков и располагается у поверхности покрытия.

На всех образцах в несплошных участках обнаружены продукты окисления, в составе которых выявлены Cu (87,5 – 89,6 %) и O (10,4 – 12,5 %) (светло-серая масса). Поры в приповерхностной зоне всех образцов частично заполнены оксидами, содержащими [O], [Al], [Cu], [Si]. Как известно [4, 5], Al_2O_3 и SiO_2 входят в состав обмазки.

Локальный химический состав фаз исследованных образцов представлен в табл. 3.

Таблица 2

Результаты определения геометрических размеров слоя

Номер образца	Толщина диффузионного слоя, * мкм			Средняя толщина пористого слоя, мкм
	средняя	минимальная	максимальная	
373.1	185	35	415	40
373.2	110	30	300	30

* Толщина слоя указана без учета участков несплошностей.

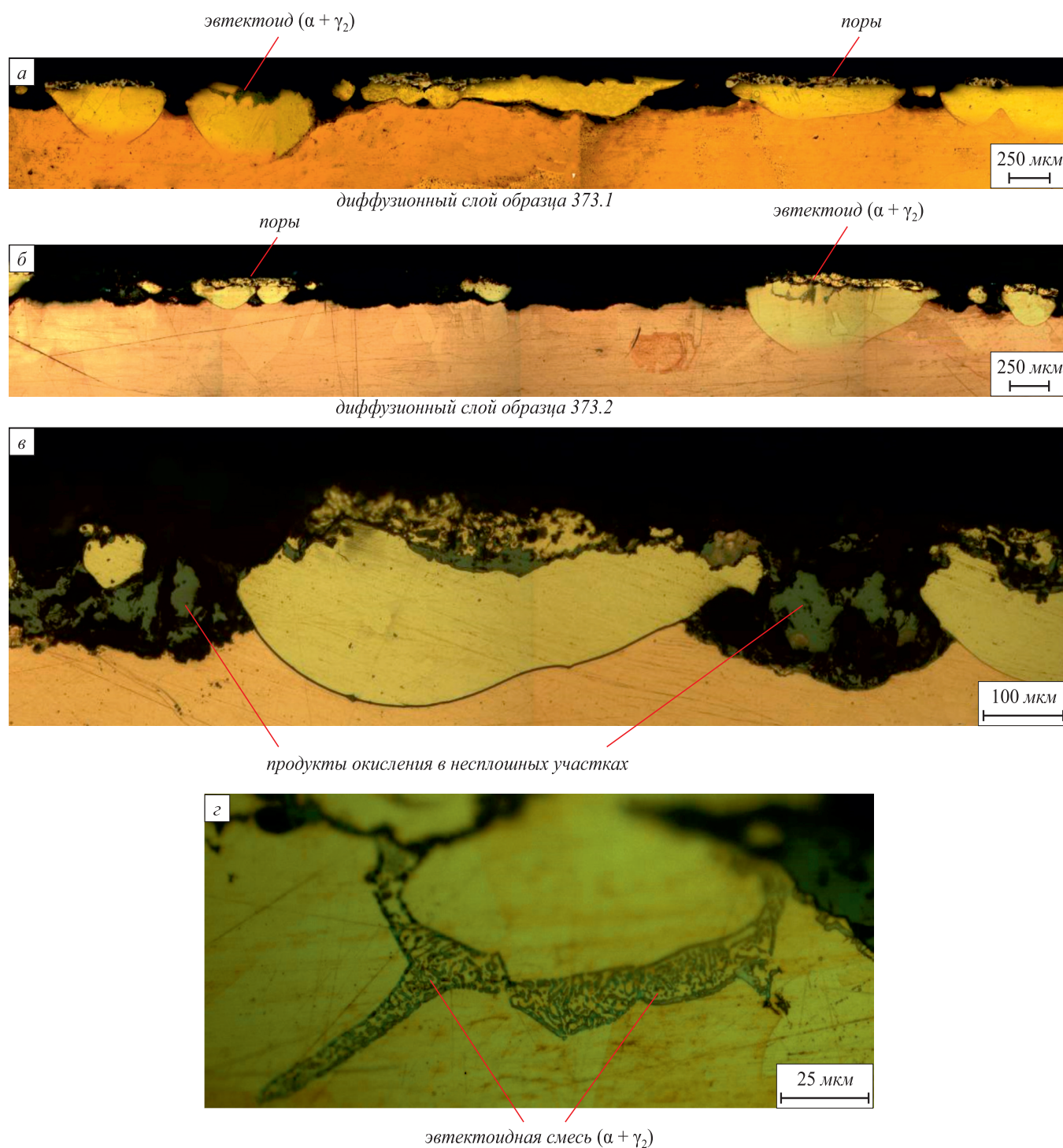


Рис. 2. Структура диффузионного слоя образцов 373.1, 373.2

Таблица 3

Локальный химический состав фаз

Химический состав фаз, %		Образец 373.1			Образец 373.2		
		Al	Si	Cu	Al	Si	Cu
эвтектоид ($\alpha + \gamma_2$)	α -фаза	8,9 – 9,0	0,8 – 0,9	90,1 – 90,2	9,1 – 9,3	0,6 – 0,7	90,0 – 90,2
	γ_2 -фаза	14,8 – 15,2	0,8 – 1,0	83,8 – 84,3	15,5 – 15,6	0,7 – 0,8	83,5 – 83,7
α -фаза		7,0 – 8,5	0,4 – 0,6	90,5 – 92,7	6,6 – 7,0	0,4 – 0,6	92,9 – 95,5

Микротвердость фаз предоставленных на исследование образцов приведена в табл. 4.

Выводы. Нанесение обмазки на рабочую поверхность воздушных фурм доменных печей сверху термообработанного алюминиевого газотермического покрытия способствует повышению стойкости фурм и снижению тепловых потерь через их поверхность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2215043 РФ. МКИ С21В7/16. Способ подготовки к работе фурмы доменной печи / В.Н. Григорьев, Г.И. Урбанович, Е.Г. Урбанович и др. Заявл. 11.12.2001, опубл. 27.10.2002. Бюл. № 30.
2. Пат. 2387716 РФ. С21В7/16. Способ подготовки фурмы доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, С.С. Ляпин и др. Заявл. 27.03.2008, опубл. 27.04.2010. Бюл. № 12.
3. Пат. 2465333 РФ. С21В7/16. Способ подготовки к работе воздушной фурмы доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Д.С. Васильев и др. Заявл. 04.02.2011, опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
4. Луканин В.Л., Орлов А.С., Удалова Е.В. Износостойкое керамическое покрытие, продлевающее эксплуатационный ресурс деталей, подвергаемых абразивному износу // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано – до макроуровня: Сб. тр. XIII Междун. научно-практич. конф. – С.-П., 2011. Ч. 2. С. 204 – 209.
5. Пат. 2453568 РФ. С09D5/18. Способ защиты поверхностей от абразивного износа / Луканин В.Л., Удалова Е.В. Заявл. 02.02.2011, опубл. 20.06.2012 Бюл. № 17.
6. Пат. № 2235789 РФ. МКИ С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи и способ нанесения защитного покрытия на дутьевую фурму доменной печи / А.Г. Маншилин, Е.Н. Складановский, В.И. Нецветов и др. Заявл. 04.11.2002, опубл. 27.05.2004 Бюл. № 15.
7. Кутателадзе С.С., Борищанский В.М. Справочник по теплопередаче. – Л. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
8. Огнеупоры для космоса: Справ. –М.: Металлургия, 1967. – 266 с.

© 2013 г. Н.Л. Кириллова, А.Г. Радюк,
А.Е. Титлянов, С.М. Горбатюк
Поступила 15 января 2013 г.

Таблица 4

Средние значения микротвердости фаз

Анализируемая фаза	Микротвердость, Н _{μ50}	
	образец 373.1	образец 373.2
Эвтектоид ($\alpha + \gamma_2$)	210	193
α -фаза	117	97
Медная основа	57	51