



Оригинальная статья

УДК 669.18

DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-555-562

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2367>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ И АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ КОВШЕВЫХ ОГНЕУПОРОВ

Н. Ф. Якушевич¹, Е. М. Запольская¹, М. В. Темлянцев¹,
Е. В. Протопопов¹, Е. Н. Темлянцева¹, М. С. Приходько^{1,2}

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. В настоящей работе исследованы процессы обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров. Процессы обезуглероживания протекают уже на стадии сушки и разогрева футеровки после ремонта, при ее тепловой обработке на газовых или электрических стендах. Эти процессы наносят непоправимый ущерб огнеупорам еще до ввода ковша в непосредственную эксплуатацию (до контакта с расплавленной сталью). Одним из направлений повышения стойкости углеродсодержащих огнеупоров против окисления является применение антиоксидантов (Al, SiC, Si и др.), которые вводят в состав сырьевой смеси на стадии изготовления. Их действие основано на приоритетном окислении по сравнению с углеродом. Антиоксиданты действуют в определенном температурном интервале, что открывает широкие возможности по разработке энерго- и ресурсосберегающих температурных режимов тепловой обработки футеровки. Проведен термогравиметрический анализ периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых безобжиговых смолосвязанных огнеупоров марок АМС 78-8/7HG, RI-MC175LC (фирма RI); MayCarb 284-AX (фирма MAYERTON), используемых при выполнении рабочих слоев футеровок сталеразливочных ковшей. Термогравиметрический анализ образцов огнеупоров осуществили на дериватографе LABSYS evo TG DTA DSC 1600 при нагреве до температуры 1100 °С со скоростью 15 °С/мин. Рентгенофазовый анализ выполняли на рентгеновском дифрактометре XRD-6000. Результаты термогравиметрического анализа представлены в виде дериватограмм. Установлено, что максимальная скорость окисления углерода во всех случаях достигается при температуре 700 – 750 °С. Следовательно, в целях реализации малообезуглероживающего первого разогрева ковша после ремонта для огнеупоров исследуемых марок рекомендуются температурные режимы, включающие низкотемпературные (до 500 °С) выдержки футеровки.

Ключевые слова: углеродсодержащие огнеупоры, сталеразливочный ковш, антиоксиданты, обезуглероживание футеровки

Финансирование: Исследование выполнено на оборудовании ЦКП «Материаловедение» Сибирского государственного индустриального университета.

Для цитирования: Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Протопопов Е.В., Темлянцева Е.Н., Приходько М.С. Исследование процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 555–562. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-555-562>

Original article

DECARBURIZATION OF PERICLASE-CARBON AND ALUMINUM-PERICLASE-CARBON LADLE REFRACTORIES

N. F. Yakushevich¹, E. M. Zapol'skaya¹, M. V. Temlyantsev¹,
E. V. Protopopov¹, E. N. Temlyantseva¹, M. S. Prikhod'ko^{1,2}

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

Abstract. In this paper, the processes of decarburization of periclase-carbon and aluminum-periclase-carbon ladle refractories were investigated. Decarburization processes take place already at the stage of drying and heating the lining after repair, during its heat treatment on gas or electric stands. These processes cause irreparable damage to refractories even before the ladle is put into direct operation (before contact with molten steel). One of the ways to increase resistance of carbon-containing refractories against oxidation is the use of antioxidants (Al, SiC, Si, etc.), which are

introduced into the composition of the raw mixture at the manufacturing stage. Their action is based on priority oxidation compared to carbon. Antioxidants act in a certain temperature range, which opens up wide opportunities for development of energy- and resource-saving temperature modes for lining heat-treatment. The authors made thermogravimetric analysis of periclase-carbon and aluminum-periclase-carbon non-ignited resin-bonded refractories of AMC 78-8/7HG, RI-MC175LC (RI); MayCarb 284-AX (MAYERTON) grades used in the execution of working layers of steel ladle linings. Thermogravimetric analysis of refractory samples was carried out on a LABSYS evo TG DTA DSC 1600 derivatograph when heated to a temperature of 1100 °C at a speed of 15 °C/min. X-ray phase analysis was performed on an XRD-6000 X-ray diffractometer. The results of thermogravimetric analysis are presented in the form of derivatograms. It was established that the maximum rate of carbon oxidation in all cases is reached at a temperature of 700 – 750 °C. Therefore, in order to implement a low-carbonizing first heating of the ladle after repair, temperature modes are recommended for refractories of the studied brands, including low-temperature (up to 500 °C) lining exposure.

Keywords: carbon-containing refractories, steel ladle, antioxidants, decarburization of lining

Funding: The study was carried out on the equipment of the Materials Science Center of the Siberian State Industrial University.

For citation: Yakushevich N.F., Zapol'skaya E.M., Temlyantsev M.V., Protopopov E.V., Temlyantseva E.N., Prikhod'ko M.S. Decarburization of periclase-carbon and aluminum-periclase-carbon ladle refractories. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 555–562. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-555-562>

ВВЕДЕНИЕ

Углеродсодержащие (периклазоуглеродистые и алюмопериклазоуглеродистые) огнеупоры получили широкое распространение для выполнения футеровок сталеразливочных ковшей. Одним из отрицательных свойств таких огнеупоров, которое снижает срок эксплуатации, является их окисление (обезуглероживание) при высоких температурах в контакте с кислородом и другими газами-окислителями [1, 2]. Процессы обезуглероживания начинаются уже на стадии сушки и разогрева футеровки после ремонта, при ее тепловой обработке на газовых или электрических стендах, то есть наносится непоправимый ущерб огнеупорам еще до ввода ковша в непосредственную эксплуатацию, до контакта с расплавленной сталью [3 – 5]. Обезуглероженный (окисленный) слой огнеупора, в котором выгорел (окислился) углерод (графит), характеризуется пониженной прочностью, повышенной пористостью и низкой сопротивляемостью против размыва расплавом. Обезуглероживание огнеупоров сокращает срок их службы, стойкость футеровки, увеличивает вероятность загрязнения стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения [6, 7].

Одним из направлений повышения стойкости углеродсодержащих огнеупоров против окисления является применение антиоксидантов (Al, SiC, Si и других), вводимых в состав сырьевой смеси на стадии изготовления. Антиоксиданты, как правило, вводят в небольших количествах (1 – 2 % (по массе)). Действие антиоксидантов основано на приоритетном окислении (связывании кислорода) по сравнению с углеродом и действуют они в определенном температурном интервале. Например, металлический алюминий снижает окисление углерода, начиная с 500 °C [8]. В периклазоуглеродистых огнеупорах, с содержанием в качестве антиоксиданта 7,5 % Al, последний при нагреве до 800 °C окисляется до Al_2O_3 с образованием шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$. Кремний начинает снижать интенсивность обезуглероживания при температурах выше 1200 °C [9 – 11], карбид кремния начинает окисляться при температурах более 800 °C, но по силе антиокислительного действия

добавки кремния и карбида кремния близки [12 – 15]. В рассматриваемом интервале температур наибольший антиокислительный эффект проявляет алюминий.

Действие антиоксидантов в определенных температурных интервалах открывает широкие возможности по разработке энерго- и ресурсосберегающих температурных режимов тепловой обработки футеровки. В частности, синхронизация промежуточных выдержек футеровки при постоянной температуре с целью прогрева футеровки по толщине, с интервалами наиболее эффективного действия конкретного антиоксиданта позволяет сократить глубину обезуглероженного слоя огнеупоров в конце разогрева [16 – 19].

В связи с этим установление температурных интервалов интенсификации обезуглероживания промышленных огнеупоров различных составов и марок актуально и имеет большое практическое значение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе проведен термогравиметрический анализ периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых безобжиговых смолосвязанных огнеупоров марок AMC 78-8/7HG, RI-MC175LC (фирма RI), MayCarb 284-AX (фирма MAYERTON), используемых при выполнении рабочих слоев футеровок сталеразливочных ковшей. Химический состав ковшевых огнеупоров представлен в табл. 1.

Термогравиметрический анализ образцов огнеупоров осуществлялся на дериватографе LABSYS evo TG DTA DSC 1600 при нагреве до 1100 °C со скоростью 15 °C/мин. Представленные на анализ образцы футеровки отличались значительной неоднородностью (рис. 1) с крупными (до 2 мм) включениями периклаза желтого цвета, белыми включениями в темно-серой однородной массе связующего вещества. Для получения достаточно корректной информации от образцов огнеупоров AMC 78-8/7HG, RI-MC175LC, MayCarb 284-AX отбиралось для анализа по две пробы.

Рентгенофазовый анализ, выполненный на рентгеновском дифрактометре XRD-6000, показал присутствие в образцах антиоксидантов алюминия, карбида кремния.

Химический состав углеродсодержащих ковшевых огнеупоров [20, 21]

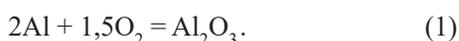
Table 1. Chemical composition of carbon-containing ladle refractories [20, 21]

Соединение	Содержание, % (по массе), в огнеупоре марки (область применения)		
	АМС 78-8/7HG (стены)	RI-MC175LC (шлаковый пояс)	MayCarb 284-AX (шлаковый пояс)
MgO	11,9	79,0	77,1
SiO ₂	5,0	2,0	3,1
CaO	0,6	1,7	1,0
Fe ₂ O ₃	2,2	1,5	0,7
C _{общ}	9,7	15,0	15,5
Al ₂ O ₃	72,1	4,0	2,6

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты термогравиметрического анализа представлены на дериватограммах: нагрев в атмосфере кислорода (рис. 2, а); нагрев в атмосфере воздуха (рис. 2, б). Во всех случаях на дериватограммах проявляются три экзотермических эффекта А, В, С (скорректированные по изменению массы ноль-кривые (0 – 0) для образцов 1, 2 и 3 – 6 обозначены штриховыми линиями).

На начальной стадии нагревания (в интервале температур 150 – 600 °С) наблюдаются достаточно мощный экзотермический эффект А и увеличение массы анализируемого вещества на 2 – 3 %. Этот эффект можно объяснить окислением присутствующего в образцах порошкообразного алюминия по следующей реакции:



При нагревании в атмосфере кислорода (рис. 2, а) в соответствии с материальным балансом реакции (1) на 30 мг анализируемого вещества количество прореа-



Рис. 1. Образец огнеупора марки RI-MC175LC

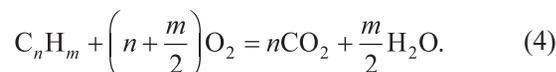
Fig. 1. Sample of RI-MC175LC refractory

гировавшего алюминия, определенное по изменению массы вещества (за счет прихода кислорода), должно составить $\frac{30 \cdot 0,02 \cdot 2 \cdot 27}{1,5 \cdot 16} = 1,35$ мг (4,5 % (по массе)).

Тепловой эффект может быть представлен площадью, которая ограничена кривой А (изменение энтальпии, выраженной в милливольтгах шкалы дериватографа) и ноль кривой, скорректированной в соответствии с изменением массы образца. Конечное (нулевое) значение энтальпийной кривой соответствует точке пересечения ее продолжения с ноль-кривой (А') при температуре примерно 600 °С для кривых 1 и 2 (АМС 78-8/7HG) или А'' при температуре примерно 700 °С для кривых 3 – 6. Подинтегральная площадь теплового эффекта для кривых 1 и 2 составляет 727 весовых (тепловых) единиц, то есть тепловой эффект во всех случаях практически одинаков по величине, но для кривых 3 – 6 растянут по времени и температуре, возможно, за счет изменения крупности алюминиевого порошка или степени его окисленности.

Следующий (наиболее мощный) экзотермический эффект В наблюдается при реакции окисления углерода скоксованного связующего материала и графита.

В процессе нагревания исследуемых образцов в атмосфере кислорода (рис. 2, а) происходит окисление углерода и частично летучих (часть летучих сгорает после их выделения в газовую фазу вне объема исследуемых образцов). Процесс окисления происходит по реакциям



В интервале температур 400 – (900 ÷ 1000) °С для области В' – В'''' – В'' (АМС 78-8/7HG) или В' – В – В'' (RI-MC175LC и MayCarb 284-AX) точки В'' и В'''' ле-

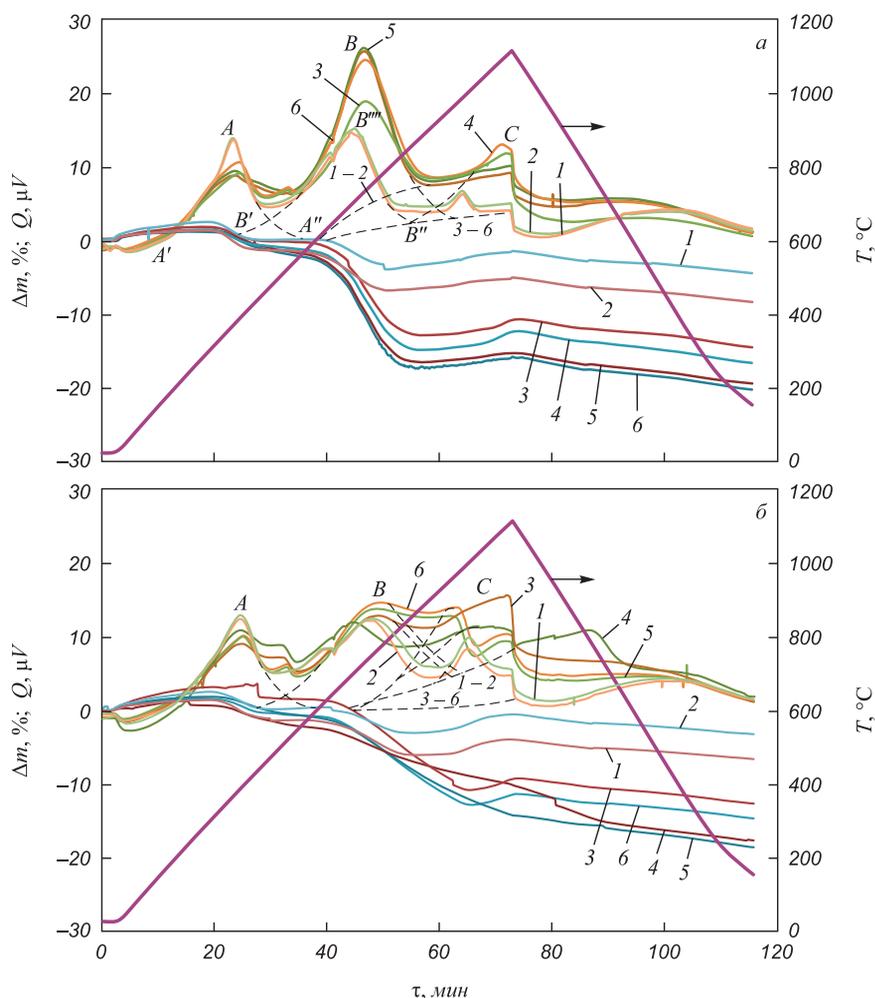


Рис. 2. Нагрев углеродсодержащих ковшевых огнеупоров в атмосфере кислорода (а) и на воздухе (б): 1 и 2 – огнеупор марки AMC 78-8/7HG; 3 и 6 – огнеупор марки MayCarb 284-AX; 4 и 5 – огнеупор марки RI-MC175LC

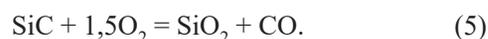
Fig. 2. Heating of carbon-containing ladle refractories in oxygen atmosphere (a) and in air (b): 1 and 2 – AMC 78-8/7HG refractory; 3 and 6 – MayCarb 284-AX refractory; 4 and 5 – RI-MC175LC refractory

жат на скорректированной за счет уменьшения массы образца ноль-кривой.

Потеря массы от реакций окисления связующего и выделения летучих для образцов 1 и 2 (AMC 78-8/7HG) составляет 4–6 %, для образцов 3–6 (RI-MC175LC и MayCarb) фактически в три раза больше и составляет 13–17 %.

Тепловой эффект от реакций окисления для образцов огнеупоров марки AMC 78-8/7HG составляет по площади $B' - B'''' - B''$ примерно 876 тепловых единиц, для образца 3 (MayCarb 284-AX) – примерно 1300 тепловых единиц, для образцов 4–6 – примерно 1700 единиц. Максимальное значение ΔH и, соответственно, максимальная скорость окисления во всех случаях наблюдается при температуре 700 °С.

Третий четко выраженный экзотермический эффект C , наблюдаемый при незначительном увеличении массы исследуемых материалов (1–2 %) в интервале температур 900–1000 °С, относится к реакции окисления карбида кремния:



Приход составляет 1,5 моля O_2 (48 г), расход 1 моль CO (28 г).

Увеличение массы на 1 моль SiC составляет примерно 20 г.

Увеличение массы навески в 30 мг составляет 0,3–0,6 мг, что соответствует

$$\begin{aligned} & \frac{(0,3 \div 0,6) \cdot 40}{20} = (0,6 \div 1,2) \text{ мг} = \\ & = \frac{(0,6 \div 1,2) \cdot 100}{30} = (2 \div 4) \% \text{ (по массе)} \end{aligned}$$

окислившегося карбида кремния.

Общая потеря массы исследуемых образцов составляет от 2–5 % (AMC 78-8/7HG) до 11–20 % (RI-MC175LC; MayCarb 284-AX).

При нагревании образцов на воздухе качественная картина термогравиметрического анализа аналогична (рис. 2, б). Также просматриваются три экзотерми-

Т а б л и ц а 2

Характеристики процессов обезуглероживания огнеупоров

Table 2. Characteristics of refractories decarburization

Параметр	Значение параметра процесса обезуглероживания огнеупора марки											
	Кислород, 15 °C/мин						Воздух, 15 °C/мин					
	AMC 78-8/7HG		MayCarb 284-AX		RI-MC175LC		AMC 78-8/7HG		MayCarb 284-AX		RI-MC175LC	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$T_{max}, °C$	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
$\Delta m_{max}, \%$	8,4	10,5	14,6	21,07	15,9	19,5	6,5	3,2	11,3	12,8	15,0	15,7
$\Delta m_A, \%$	12,4	12,4	9,9	11,2	9,9	9,9	12,4	12,3	10,1	10,1	10,9	9,1
$\Delta m_B, \%$	14,6	14,6	18,69	24,0	25,1	25,7	12,1	12,2	13,8	14,7	11,4	12,4
$\Delta m_C, \%$	4,9	4,0	11,4	12,9	10,8	9,7	5,7	4,7	9,7	10,4	11,2	15,5
$\Delta m_D, \%$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$\Sigma H_A, \text{y.ед.}$	727	727	653	685	653	653	844	841	779	757	805	757
$\Sigma H_B, \text{y.ед.}$	876	878	1342	1727	1753	1753	1439	1312	1584	1627	1262	1527
$\Sigma H_C, \text{y.ед.}$	116	75	385	402	349	323	107	65	417	844	1061	1301
$(t_{нач} - t_{кон})_A, °C$	194 – 551	194 – 551	194 – 551	194 – 551	194 – 551	194 – 551	173 – 550	173 – 550	173 – 550	173 – 550	173 – 550	173 – 550
$(t_{нач} - t_{кон})_B, °C$	408 – 880	408 – 880	408 – 880	408 – 880	408 – 880	408 – 880	418 – 904	418 – 904	418 – 904	418 – 904	418 – 904	418 – 904
$(t_{нач} - t_{кон})_C, °C$	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107
$t_{max, A}, °C$	398	398	398	398	398	398	398	398	398	398	398	398
$t_{max, B}, °C$	710	710	770	770	770	770	748	748	748	748	748	748
$t_{max, C}, °C$	1105	1105	1105	1105	1105	1105	1107	1107	1107	1107	1107	1107

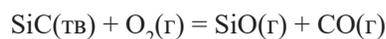
ческих эффекта: от окисления алюминия (*A*), углерода (*B*) и карбида кремния (*C*). Поскольку парциальное давление кислорода в газовой фазе значительно ниже ($P_{O_2} = 0,21$), реакции окисления протекают медленнее и заканчиваются при более высоких температурах. Численные сравнительные характеристики процессов приведены в табл. 2 (где T_{max} – максимальная температура разогрева печи; Δm_{max} – максимальная потеря массы; $\Delta m_A, \Delta m_B, \Delta m_C, \Delta m_D$ – потеря массы для области *A, B, C, D*; $\Sigma H_A, \Sigma H_B, \Sigma H_C$ – тепло, выделившееся при протекании реакции, для области *A, B, C, D*; $(t_{нач} - t_{кон})_A, (t_{нач} - t_{кон})_B, (t_{нач} - t_{кон})_C$ – температура для области *A, B, C, D*; $t_{max A}, t_{max B}, t_{max C}$ – максимальная температура для области *A, B, C, D*).

В интервале температур 450 – 600 °С на экзотермический эффект реакции окисления алюминия *A* и сопряженный с ним эффект окисления углерода *B* практически на всех кривых $\Delta H = f(t)$ накладывается незначительный по величине ΔH эффект частичного окисления летучих *D* (*D'*), которое протекает практически без изменения массы материала Δm (составляет примерно $\pm 1\%$, при нагревании в атмосфере кислорода этот эффект в очень малой степени проявился лишь на огнеупоре марки MayCarb 284-AX образце 1). Окисление углерода во всех случаях начинается при температуре 450 – 500 °С, заканчивается при 980 – 1000 °С для образцов 1 и 2 (АМС 78-8/7HG) и при 960 – 980 °С для образцов 3 – 6 (RI-MC175LC; MayCarb 284-AX), максимальная скорость окисления углерода во всех случаях достигается при температуре 700 – 750 °С.

Окисление карбида кремния (экзотермический эффект *C*) начинается при 950 – 1050 °С для огнеупора марки АМС 78-8/7HG и 800 – 950 °С для образцов 3 – 6 огнеупоров марки RI-MC175LC и MayCarb 284-AX

(при нагревании в атмосфере кислорода соответственно при 900 °С (1, 2) и 800 – 850 °С). Процесс в соответствии с реакцией (5) протекает с незначительным увеличением массы образца (1 – 2 %) и практически завершается при 1100 °С при нагревании в атмосфере кислорода, при нагревании на воздухе корректно судить о завершении процесса можно лишь для образцов 1 и 2 (АМС 78-8/7HG).

Для уточнения интерпретируемых вопросов дополнительно проведен термогравиметрический анализ огнеупора марки RI-MC175LC (образец 3) с нагреванием его на воздухе до температуры 1500 °С со скоростью 10 °С/мин с последующей выдержкой в течение примерно 5 мин и охлаждением до 20 °С (рис. 3). На кривой RI-MC175LC (образец 3) достаточно точно дублируются все описанные ранее экзотермические эффекты со сдвигом в сторону более высоких температур вследствие более медленного (10 °С/мин) нагрева. Окисление карбида кремния в интервале температур 600 – 1100 °С (с потерей массы $\Delta m = 10\%$) характеризуется мощным экзотермическим эффектом. Это говорит о том, что в условиях медленного нагрева преимущественно протекает реакция



с образованием газообразного оксида кремния SiO(г).

Выводы

В результате проведенного термогравиметрического анализа образцов углеродсодержащих огнеупоров марок АМС 78-8/7HG, RI-MC175LC, MayCarb 284-AX установлено, что алюмопериклазоуглеродистые огнеупоры АМС 78-8/7HG, применяемые для футеровки стен сталеразливочных ковшей, содержащие 9,7 % С, по сравнению с периклазоуглеродистыми RI-MC175LC и MayCarb 284-AX, применяемыми для футеровки шлакового пояса и содержащими 15,0 и 15,5 % С соответственно, характеризуются более высокой стойкостью к обезуглероживанию при нагреве до температур 1100 °С. Общая потеря массы исследуемых образцов составляет от 2 – 5 % (АМС 78-8/7HG) до 11 – 20 % (RI-MC175LC, MayCarb 284-AX). Окисление углерода, содержащегося в огнеупорах, начинается при температуре 450 – 500 °С, заканчивается при 980 – 1000 °С (МС 78-8/7HG) и при 960 – 980 °С (RI-MC175LC и MayCarb 284-AX). Максимальная скорость окисления углерода (обезуглероживания огнеупора) во всех случаях достигается при температуре 700 – 750 °С. В целях реализации малообезуглероживающего первого разогрева ковша после ремонта для огнеупоров исследуемых марок рекомендуются температурные режимы, включающие низкотемпературные (до 500 °С) выдержки футеровки.

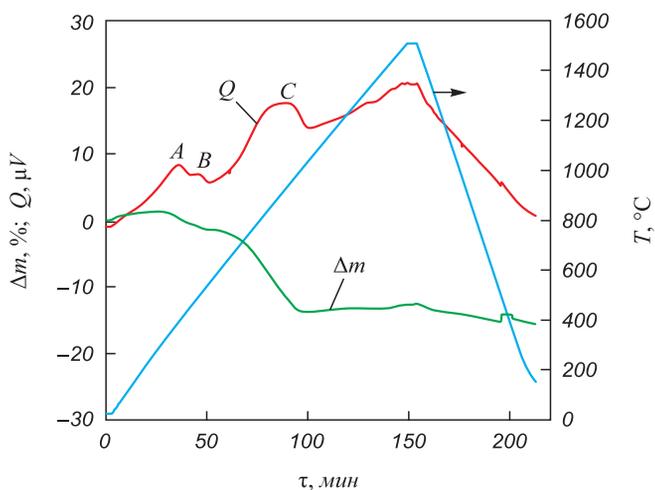


Рис. 3. Нагрев углеродсодержащих ковшевых огнеупоров на воздухе до температуры 1500 °С со скоростью 10 °С/мин

Fig. 3. Heating of carbon-containing ladle refractories in air to 1500 °C at a speed of 10 °C/min

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Темлянец М.В., Матвеев М.В. Обезуглероживание периклазоуглеродистых огнеупоров при тепловой обработке футеровок сталеразливочных ковшей // *Металлург*. 2010. № 8. С. 60–62.
2. Turkdogan E.T. Ladle deoxidation, desulphurisation and inclusions in steel – Part 1: Fundamentals // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1983. Vol. 1. No. 54. P. 1–10. <https://doi.org/10.1002/srin.198305191>
3. Темлянец М.В., Матвеев М.В. Исследование обезуглероживания периклазоуглеродистых огнеупоров при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей перед приемом расплава // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. Т. 53. № 10. С. 38–40.
4. Ahuja R., Sahai Y. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes // *Ironmaking and Steelmaking*. 1986. Vol. 13. No. 5. P. 241–247.
5. Темлянец М.В., Матвеев М.В., Темлянцева Е.Н. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011. Т. 54. № 10. С. 32–36.
6. Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Запольская Е.М., Максаква К.Е., Дегтярь В.А. Исследование высокотемпературного обезуглероживания алумопериклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 12. С. 24–28. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-24-28>
7. Pivinskii Yu.E. HCBS ceramic concretes in the XXI century – problems and prospects for applying technology in the field of silicate materials science. Part 1 // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011. Vol. 52. No. 2. P. 107–115. <https://doi.org/10.1007/s11148-011-9376-z>
8. Кашеев И.Д., Сизов В.И., Панин О.А. Свойства периклазоуглеродистых огнеупоров с добавками металлических порошков // *Огнеупоры*. 1989. № 8. С. 7–9.
9. Очагова И.Г. Повышение стойкости к окислению высокоуглеродистых бетонов с применением смеси антиоксидантов // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2011. № 1. С. 88–91.
10. Andreev V.V., Lubyanoi D.A., Samsonov Yu.N., Kaminskaya I.A., Lubyanyaya S.V. Development of extra-furnace treatment technology for blast-furnace iron in order to manufacture replacement metallurgical equipment with improved operating life // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 5-6. P. 492–495. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9939-6>
11. Pluschkell W. Metallurgical reaction techniques for adjusting very low contents of C, P, S and N in steel // *Stahl und Eisen*. 1990. Vol. 110. No. 5. P. 61–70.
12. Симонов К.В., Коптелов В.Н., Будрина Г.В. и др. Влияние антиокислительных добавок на свойства периклазоуглеродистых огнеупоров на нетоксичной связке // *Огнеупоры*. 1989. № 10. С. 32–34.
13. Да Сильвейра В., Фальк Г., Клазен Р. Коллоидная обработка антиоксидантов для манипулирования микроструктурой в MgO–C-кирпиче // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2010. № 10. С. 32–41.
14. Socha L., Hudzieczek Z., Michalek K., Pilka V., Piegza Z. Verification of physical modelling of steel desulphurization in the plant conditions of the homogenization station. In: *METAL 2014 – 23rd Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conf. Proceedings*. 2014. P. 64–71.
15. Manning C.P., Fruehan R.J. Emerging technologies for iron and steelmaking // *JOM*. 2001. Vol. 53. No. 10. P. 36–43. <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0054-3>
16. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006. Vol. 37. No. 5. P. 733–761. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0>
17. Ouchi C. Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching processes // *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. No. 6. P. 542–553. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.542>
1. Temlyantsev M.V., Matveev M.V. Decarburization of periclase-carbon refractories during heat treatment of the linings of steel-pouring ladles. *Metallurgist*. 2010, vol. 54, no.7-8, pp. 536–539. <https://doi.org/10.1007/s11015-010-9335-9>
2. Turkdogan E.T. Ladle deoxidation, desulphurisation and inclusions in steel – Part 1: Fundamentals. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1983, vol. 1, no. 54, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1002/srin.198305191>
3. Temlyantsev M.V., Matveev M.V. Decarburization of periclase-carbon refractories when heating steel ladles lining of before melt output. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, vol. 53, no. 10, pp. 38–40. (In Russ.).
4. Ahuja R., Sahai Y. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes. *Ironmaking and Steelmaking*. 1986, vol. 13, no. 5, pp. 241–247
5. Temlyantsev M.V., Matveev M.V., Temlyantseva E.N. Influence of various factors on decarburization of periclase-carbon ladle refractories. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, vol. 54, no. 10, pp. 32–36. (In Russ.).
6. Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Zapol'skaya E.M., Maksakova K.E., Degtyar' V.A. Research on high-temperature decarburization of alum-periclase-carbon ladle refractories. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 12, pp. 24–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-24-28>
7. Pivinskii Yu.E. HCBS ceramic concretes in the XXI century – problems and prospects for applying technology in the field of silicate materials science. Part 1. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011, vol. 52, no. 2, pp. 107–115. <https://doi.org/10.1007/s11148-011-9376-z>
8. Kashcheev I.D., Sizov V.I., Panin O.A. Properties of periclase-carbon refractories with additives of metal powders. *Ogneupory*. 1989, no. 8, pp. 7–9. (In Russ.).
9. Ochagova I.G. Increasing the oxidation resistance of high-carbon concrete with the use of antioxidants mixture. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*. 2011, no. 1, pp. 88–91. (In Russ.).
10. Andreev V.V., Lubyanoi D.A., Samsonov Yu.N., Kaminskaya I.A., Lubyanyaya S.V. Development of extra-furnace treatment technology for blast-furnace iron in order to manufacture replacement metallurgical equipment with improved operating life. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5-6, pp. 492–495. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9939-6>
11. Pluschkell W. Metallurgical reaction techniques for adjusting very low contents of C, P, S and N in steel. *Stahl und Eisen*. 1990, vol. 110, no. 5, pp. 61–70.
12. Simonov K.V., Koptelov V.N., Budrina G.V., etc. The effect of antioxidant additives on properties of periclase-carbon refractories on a non-toxic bundle. *Ogneupory*. 1989, no. 10, pp. 32–34. (In Russ.).
13. Da Sil'veja V., Fal'k G., Klazen R. Colloidal processing of antioxidants for microstructure manipulation in MgO–C-bricks. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2010, no. 10, pp. 32–41. (In Russ.).
14. Socha L., Hudzieczek Z., Michalek K., Pilka V., Piegza Z. Verification of physical modelling of steel desulphurization in the plant conditions of the homogenization station. In: *METAL 2014 – 23rd Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conf. Proceedings*. 2014, pp. 64–71.
15. Manning C.P., Fruehan R.J. Emerging technologies for iron and steelmaking. *JOM*. 2001, vol. 53, no. 10, pp. 36–43. <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0054-3>
16. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, vol. 37B, no. 5, pp. 733–761. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0>
17. Ouchi C. Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching processes. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 6, pp. 542–553. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.542>

18. Paul S.K., Ray A. Influence of inclusion characteristics on the formability and toughness properties of a hot-rolled deep-drawing quality steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1997. Vol. 6. No. 1. P. 27–34. <https://doi.org/10.1007/s11665-997-0028-x>
19. Wilson A.D. Clean steel technology – fundamental to the development of high performance steels // *ASTM Special Technical Publication*. 1999. No. 1361. P. 73–88. <https://doi.org/10.1520/stp12375s>
20. Производство ферросилиция. Справочник / Под ред. Ю.П. Снитко. Новокузнецк, 2000. 426 с.
21. Кашлев И.М., Солдатов А.И., Брыляков В.И., Кузин В.В. Связующие для производства электродной массы. В кн.: Совершенствование производства ферросилиция. Материалы заводской научно-технической конференции. Новокузнецк, 1997. С. 115–126.
18. Paul S.K., Ray A. Influence of inclusion characteristics on the formability and toughness properties of a hot-rolled deep-drawing quality steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1997, vol. 6, no. 1, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1007/s11665-997-0028-x>
19. Wilson A.D. Clean steel technology – fundamental to the development of high performance steels. *ASTM Special Technical Publication*. 1999, no. 1361, pp. 73–88. <https://doi.org/10.1520/stp12375s>
20. *Production of Ferrosilicon. Guide*. Snitko Yu.P. ed. Novokuznetsk, 2000, 426 p. (In Russ.).
21. Kashlev I.M., Soldatov A.I., Brylyakov V.I., Kuzin V.V. Binders for production of electrode mass. In: *Improvement of Ferrosilicon Production. Materials of the Factory Sci. and Tech. Conf.* Novokuznetsk, 1997, pp. 115–126. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Филиппович Якушевич, д.т.н., профессор-консультант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiiu.ru

Екатерина Михайловна Запольская, соискатель степени к.т.н., Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-8098-5895
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор, проректор по учебной и воспитательной работе, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-7985-5666
E-mail: uchebn_otdel@sibsiiu.ru

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiiu.ru

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Максим Сергеевич Приходько, аспирант кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет, старший менеджер Проекта Дирекции по управлению проектами, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: Maxim.Prikhodko@evraz.com

Nikolai F. Yakushevich, Dr. Sci. (Eng.), Prof.-Consultant of the Chair “Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering”, Siberian State Industrial University
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiiu.ru

Ekaterina M. Zapol'skaya, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.), Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-8098-5895
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Educational Work, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-7985-5666
E-mail: uchebn_otdel@sibsiiu.ru

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiiu.ru

Elena N. Temlyantseva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Siberian State Industrial University
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Maksim S. Prikhodko, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University, Senior Project Manager of the Project Management Directorate, JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Combine
E-mail: Maxim.Prikhodko@evraz.com

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н. Ф. Якушевич – проведение расчетов, их анализ, подготовка и корректура текста.

Е. М. Запольская – проведение расчетов, обработка библиографического списка, обработка графического материала.

М. В. Темлянец – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование и корректура финальной версии статьи.

Е. В. Протопопов – формирование концепции статьи, определение цели и задачи исследования, подготовка текста.

Е. Н. Темлянцева – проведение расчетов, подготовка и оформление текстового и графического материала.

М. С. Приходько – подготовка и оформление текстового материала.

N. F. Yakushevich – conducting and analysis of the calculations, preparation and correction of the text.

E. M. Zapol'skaya – conducting the calculations, formation of references, processing graphic material.

M. V. Temlyantsev – scientific guidance, analysis of the research results, editing and correction of the article final version.

E. V. Protopopov – formation of the article concept, formation of goal and objectives of the study, preparation of the text.

E. N. Temlyantseva – conducting the calculations, preparation and design of text and graphic material.

M. S. Prikhod'ko – preparation and design of the text.

Поступила в редакцию 22.06.2022
 После доработки 29.06.2022
 Принята к публикации 29.06.2022

Received 22.06.2022
 Revised 29.06.2022
 Accepted 29.06.2022