АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ФУТЕРОВКА СТАЛРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ: ТЕХНИЧЕСКИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

*Л. М. АКСЕЛЬРОД, канд. техн. наук, axelrodlev@yandex.ru; В. ГАРТЕН
(VGH AG Victoria Garten Huttenindustribedarf AG, Германия)*

Аннотация. Качество футеровки сталеразливочных ковшей во многом определяет экономическую эффективность сталеплавильного производства. Прямые затраты на огнеупорную футеровку сталеразливочных ковшей достигают 30–50 % затрат на огнеупоры сталеплавильного комплекса. Рассмотрен опыт использования огнеупорных материалов различного состава с целью повышения эффективности применения огнеупоров в футеровке сталеразливочных ковшей в условиях внепечной обработки стали. Показаны существующие возможности выполнения футеровки стен и дна сталеразливочного ковша как углеродсодержащими, так и безуглеродистыми огнеупорными материалами с учетом экономической составляющей. Основу футеровок сталеплавильных агрегатов — конвертеров, ДСП, а также сталеразливочных ковшей — составляют периклазоуглеродистые (MgO-C) огнеупоры. Однако эти огнеупоры обладают высокой теплопроводностью, что отрицательно влияет на тепловую работу сталеразливочных ковшей. При использовании MgO-C -изделий по мере уменьшения остаточной толщины изделий в стенах ковшей возможно появление вертикальных трещин. При определенных условиях происходит скалывание рабочей футеровки, возникают проблемы с разрушением футеровки по углам изделий с образованием полостей на стыке огнеупоров. Для нивелирования недостатков MgO-C -изделий применяются периклазоалюмоуглеродистые ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-C}$) и алюмопериклазоуглеродистые ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$) огнеупорные изделия. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ огнеупоры широко используются в наиболее эрозионно напряженной зоне футеровки — в бойном месте футеровки дна сталеразливочного ковша. Монолитная футеровка дна сталеразливочных ковшей в России успешно вытесняет футеровку штучными изделиями, в том числе алюмопериклазоуглеродистыми. Такая замена позволяет снизить удельный расход огнеупоров и удельные затраты на них. Технология применения бетона в дне к настоящему времени внедрена на ковшах конвертерных и электросталеплавильных цехов. На сталеразливочных ковшах емкостью 120–180 т интенсивно внедряется технология изготовления бетонных дна и стен. Преимуществами бетонных футеровок сталеразливочных ковшей являются: высокая устойчивость к пропитке металлошлаковым расплавом; отсутствие науглероживания металла от углерода из футеровки ковша; увеличение продолжительности эксплуатации арматурного слоя футеровки в 2–2,5 раза; отсутствие необходимости применения гнездовых блоков как в сталевыпускном узле, так и для установки донной продувочной фурмы; отсутствие трещин в футеровке, разрывов по швам, углам и ребрам изделий; снижение (остается только шлаковый пояс, где изделия на органическом связующем) количества выделений газообразных углеводородов (фенол, формальдегид, бенз-а-пирен) при сушке, разогреве и эксплуатации футеровки; экономия материалов, рабочего времени и рабочей силы при выполнении и при уходе за футеровкой; снижение удельных расходов и удельных затрат на огнеупоры на 1 т стали. Для футеровки сталеразливочных ковшей большой вместимости (от 250 т) в Китае, Европе и Японии широко используют алюмопериклазовые (алюмошпинельные) изделия. Для таких футеровок меньшее значение имеют термомеханические напряжения, возникающие в монолитной футеровке ковша, в том числе при его перемещении с металлом с использованием крана. Изделиями легче компенсировать отклонения в геометрии ковша, которые являются следствием изменений геометрии металлического корпуса со временем. Зафиксировано положительное влияние безуглеродистой футеровки, а также футеровки с низким содержанием оксида магния на качество металла, в первую очередь низко- и ультранизкоуглеродистого, а также трубных низколегированных сталей.

Ключевые слова: огнеупорные материалы, сталеразливочный ковш, периклазоуглеродистые огнеупорные изделия, периклазоалюмоуглеродистые огнеупорные изделия, алюмопериклазоуглеродистые огнеупорные изделия, монолитная футеровка, алюмопериклазоуглеродистые изделия, доломитопериклазоуглеродистые огнеупорные изделия.

Ссылка для цитирования. Аксельрод Л.М., Гартен В. Альтернативная футеровка сталеразливочных ковшей: технический и экономический аспекты // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 12. С. 72–80.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-12-72-80

AN ALTERNATIVE LINING OF STEEL LADLES: TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS

L. M. AKSELROD, PhD (Tech), axelrodlev@yandex.ru; V. GARTEN
(VGH AG Victoria Garten Huttenindustriebedarf AG, Германия)

Abstract. Quality of steel ladles lining to a big extent determine the economic efficiency of steel-making operation. Direct costs on the refractory lining of them can reach 30–50 % of the costs of lining of a steel-making complex. Experience of utilization of refractory materials of different composition considered with the purpose of efficiency increase of refractory materials application in the steel ladles lining under conditions of steel ladle treatment. Considerable abilities shown to make the lining of steel ladle walls and bottom by both carbon-containing and carbon-free refractory materials taking into account the economic aspect. Lining base of steel-making facilities — BOFs, EAFs and steel ladles — is composed by periclase-carbon (MgO–C) refractories. However those refractories have a high heat conductivity, that effects on the heat operation of steel ladles. When using MgO–C materials, vertical fractures can appear in the ladle walls lining as its residual thickness becomes small. Under definite conditions a working lining chipping takes place, problems appear with lining destruction in the pieces angles with cavities formation at the pieces joining. To level the MgO–C drawbacks, periclase-alumo-carbon (MgO–Al₂O₃–C) and alumo-periclase-carbon (Al₂O₃–MgO–C) refractory products are used. Al₂O₃–MgO–C refractories are widely used in most erosion-intensive lining zone — in the combatting place of steel ladle bottom lining. In Russia monolithic lining of steel ladle bottom is successfully displacing the lining by piece products, including alumo-periclase-carbon ones. Such a replace enables to decrease specific refractory consumption and specific costs of them. At present the technology of concrete application to bottom is implemented for ladles of BOF- and steel-making shops. A technology of concrete ladle walls and bottom is intensively implemented for 120–180-ton ladles. The concrete lining of steel ladles has the following advantages: high withstandability against impregnation by metal-slag melt; absence of metal carbonization by the carbon from ladle lining; increase of running duration of safety lining layer by 2–2.5 times; absence of necessity to use nest blocks in both steel outlet unit and for bottom blow-off lance; absence of cracks in lining, wash-outs in seams, angles and edges of pieces; decrease of gaseous hydrocarbon emissions (phenol, formaldehyde, benzapilene) during lining drying, heating-up and operation (only slag belt remains, where pieces have organic binders); saving of materials, working time and manpower while making and maintain the lining; decrease of specific consumption and specific costs for lining per 1t of steel. For lining of steel ladles of big volumes (more 250 t) alumo-periclase (alumo-spinel) products are widely used in China, Europe and Japan. For such a lining the thermo-mechanical tension, arising in monolithic ladle lining, has a less importance, including at its replacing with metal by using crane. It is easier for the products to compensate the ladle geometry change, resulted in metal shall geometry change in time. A positive influence of carbon-free lining, as well as a lining with low content of magnesium oxide, on metal quality noted, first of all for low- and ultralow carbon grades, and pipe low-alloyed steels

Key words: refractory materials, steel ladle, periclase-carbon refractory products, periclase-alumo-carbon refractory products, alumo-periclase-carbon refractory products, monolithic lining, dolomite-periclase-carbon products.

For citation: Akselrod L.M., Garten V. An alternative lining of steel ladles: technical and economic aspects. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 12, pp. 72–80. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-12-72-80

Внепечная обработка стали — обязательный элемент технологии производства высококачественного металла и увеличения объема выплавки. Решение поставленных задач превратило сталеразливочный ковш (СК) в агрегат доводки стали до необходимых кондиций. С изменением функции СК существенно изменилась и роль футеровки этого агрегата. В СК осуществляется финальная доводка стали в процессе внепечной обработки с использованием установки ковш-печь (LF), ковша в сочетании с циркуляционным вакууматором (RH), вакуумирования металла в ковше (VD), при этом увеличивается время взаимодействия перегретой стали с огнеупорной футеровкой. Процесс взаимодействия интенсифицируется при перемещении металла в ковше под воздействием донной продувки металла, имеет место также воздействие различных добавок и раскислителей. Требуется обеспечить не только качество металла, но и снижение удельных затрат, минимизацию тепловых потерь, безопасность эксплуатации агрегата.

Прямые затраты на огнеупорную футеровку СК составляют 30–50 % затрат на огнеупоры сталеплавильного комплекса. При этом если все

прямые затраты на огнеупоры в себестоимости выплавляемой стали оцениваются в 2–4 %, то с учетом косвенных затрат, связанных с использованием огнеупорной футеровки комплекса металлургических агрегатов в сталеплавильном производстве, эта цифра достигает 10 % и более. Поэтому огнеупорная футеровка СК — ключевой фактор экономики работы сталеплавильного цеха. В то же время именно в футеровке СК имеет место вариативность в выборе конструкции футеровки в сочетании с подбором соответствующих огнеупоров с целью решения производственных задач.

На протяжении последних 10 лет, до марта-апреля 2017 г., дефицита в периклазе различных сортов не ощущалось, цены оставались достаточно стабильными. В 2017 г. произошел скачок цен на периклазосодержащие сырьевые материалы. Причина скачка цен всем известна [1]. Правительство Китая реализовало ряд мероприятий, направленных на решение экологических проблем, а также экономических задач. В результате реально было снижено производство периклаза и в первую очередь плавленного периклаза высоких марок. Возник дефицит перик-

лаза на рынке, цены выросли в несколько раз. По прошествии года цены стабилизировались на высоком уровне. Metallургия не остановилась, хотя возросшие цены на периклаз и в меньшей мере на графит сказались на себестоимости периклазосодержащих огнеупорных материалов. Цены на периклазоуглеродистые огнеупоры выросли в зависимости от качества изделий в 2–3 раза. Следует отметить, что процесс восполнения образовавшегося количественного дефицита идет успешно: постепенно восстанавливается производство плавного периклаза в Китае. К 2020 г. в Китае планируется рост производства плавного периклаза на 100 тыс. т в сравнении с 2016 г. Возобновлено производство высококачественного плавного периклаза фирмой RHI Magnesita в Норвегии (до 85 тыс. т), к настоящему времени на 30 тыс. т увеличила производство этого материала Турция, и в России усилиями ООО «Группа Магнезит» к 2020 г. объем производства плавного периклаза может составить 150–170 тыс. т (сейчас 70–80 тыс. т). Но

ожидать снижения цен на столь функционально ценный материал до и после 2020 г. не придется. Причина этого заключается в снижении добычи в Китае высококачественного сырого магнезита, который является исходным сырьем при производстве плавного периклаза необходимого качества.

В сложившейся ситуации металлурги, и не только в России, обращают внимание на иные технологии, находившиеся ранее под давлением как технических, так и ценовых факторов.

В табл. 1 представлены основные виды огнеупоров, используемых в футеровке стен и дна СК: периклазоуглеродистые ($MgO-C$), периклазоалюмоуглеродистые ($MgO-Al_2O_3-C$), алюмопериклазоуглеродистые ($Al_2O_3-MgO-C$), периклазоизвестковоуглеродистые, они же периклазодоломитоуглеродистые ($MgO-MgO \cdot CaO-C$), алюмопериклазовые (Al_2O_3-MgO) изделия и алюмопериклазовый (алюмошпинельный) бетон (Al_2O_3-MgO).

ТАБЛИЦА 1. ВИДЫ ОГНЕУПОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ФУТЕРОВКЕ СТЕН В ЗОНЕ МЕТАЛЛА И ДНА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

TABLE 1. TYPES OF REFRACTORIES, USED IN THE WALLS LINING IN METAL ZONE AND BOTTOM OF STEEL LADLE

Показатель	Огнеупорный материал					
	$MgO-C$ (изделия)	$MgO-Al_2O_3-C$ (изделия)	$Al_2O_3-MgO-C$ (изделия)	$MgO-MgO \cdot CaO-C$ (изделия)	Al_2O_3-MgO (бетон)	Al_2O_3-MgO (изделия)
Массовая доля, %:						
MgO	86–91	55–65	5–20	55–60	4–6	4–7
Al_2O_3	—	20–35	65–85	—	91–93	93–95
CaO	—	—	—	30–40	1,5–2,5	—
C	6–10	5–8	5–8	5–7	—	—
Пористость открытая, %	≤ 5	≤ 7	≤ 6	≤ 8	16–18	13–17
Линейное изменение, %:						
при 110 °C	0,13	0,1	Нет св.	0	–0,05	–0,03
200 °C	1,0–1,15	0,7–0,9	То же	+(0,5–0,7)	Нет св.	Нет св.
1000 °C	1,77–1,83	1,3–1,6	+2,5	+(0,8–1,3)	–0,05	–0,05
1500 °C	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	+(0,8–1,2)	+(1,51–2,4)
Теплопроводность, Вт/(м·К):						
при 110 °C	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	3,8	Нет св.
200 °C	10–12	9–11	9–10	То же	Нет св.	3,2
1000 °C	7,5–9,5	8–9	6,5–9,2	4,5–5	3–4	—
1200 °C	7–8	6–7	2,5–4,5	2,5–3,8	2,8–3,2	2,7
1600 °C	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	2,7	Нет св.
<i>Примечание.</i> В таблице приведены показатели для типичных вариантов огнеупорных материалов, реально вариантов по содержанию основных оксидов для каждого типа огнеупорных материалов существенно больше, особенно для алюмопериклазоуглеродистых и периклазоизвестковых изделий.						

Периклазосодержащие углеродистые огнеупоры

Периклазоуглеродистые ($MgO-C$) огнеупоры и в настоящее время составляют основу футеровок сталеплавильных агрегатов: конвертеров и ДСП, а также СК.

Огнеупорные изделия в футеровке шлаковых поясов СК остаются на сегодня безальтернативным решением, это периклазоуглеродистые ($MgO-C$) изделия на основе плавного перик-

лаза, графита, антиоксидантов и т. д. Что касается футеровки стен и дна ковшей, вариантов несколько, при том что огнеупоры в рабочей футеровке этих зон составляют до 65 % массы футеровки СК. Новые технические решения в основном дешевле (руб/т стали) при сохранении или даже увеличении стойкости соответствующей зоны футеровки.

При использовании MgO–C-изделий в стенах СК возможно появление вертикальных трещин (рис. 1), особенно по мере уменьшения остаточной толщины изделий. Не будем останавливаться на причинах этого процесса, он изучается непрерывно на протяжении многих лет. Причина, по мнению большинства исследователей, заключается в возникающих термомеханических напряжениях в футеровке [2].

Результатом термомеханических напряжений в футеровке и в первую очередь в некотором слое огнеупора, контактирующего с жидким металлом и шлаком и неизбежно остывающем в межплавочный период, является скалывание рабочей футеровки в определенных условиях [3]. Время от времени возникают проблемы с разрушением футеровки по углам изделий с образованием полостей на стыке огнеупоров и также ребер с формированием так называемых “буханок” на рабочей поверхности, контактирующей с металлом. Причиной этих проблем являются как знакопеременные термомеханические

напряжения, так и ошибки в технологии изготовления изделий. Периклазоуглеродистые огнеупоры обладают высокой теплопроводностью, что отрицательно влияет на тепловую работу СК. Исходные данные для теплового расчета показаны на рис. 2. Расчет температуры на корпусе СК в зависимости от материала рабочей футеровки для многослойной футеровки СК приведен в табл. 2. Высокая теплопроводность периклазоуглеродистых огнеупоров способствует потерям тепла расплавом стали при недостаточной теплоизоляции в стенах или вынуждает иметь повышенную толщину футеровки.

Рис. 1. Вертикальные трещины в периклазоуглеродистой футеровке сталеразливочного ковша

Fig. 1. Vertical cracks in periclase-carbon lining of steel ladle

Рис. 2. Многослойная футеровка сталеразливочного ковша

Fig. 2. Multilayer lining of steel ladle

Чтобы нивелировать некоторые недостатки MgO–C-изделий в стенах СК, на рынке появились периклазоалюмоуглеродистые ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-C}$) и алюмопериклазоуглеродистые ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$) огнеупорные изделия (см. табл. 1), причем соотношение оксидов магния и алюминия в тех и других варьируется в достаточно широких пре-

делах при сохранении содержания углерода на уровне 5–10 %.

В качестве алюмокомпонента используется: табулярный глинозем (>98 % Al_2O_3), плавный белый (>98 % Al_2O_3) и коричневый (>95 % Al_2O_3) корунд, высокоплотный обожженный боксит (>88 % Al_2O_3), а также алюмомагнезиальная шпатель ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$).

ТАБЛИЦА 2. ТЕМПЕРАТУРА НА КОРПУСЕ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТЕРИАЛА РАБОЧЕЙ ФУТЕРОВКИ

TABLE 2. TEMPERATURE ON STEEL LADLE SHELL DEPENDING ON MATERIAL OF WORKING LINING

Огнеупорный материал рабочей футеровки	Толщина, мм	Температура на корпусе ковша, °C
Периклазоуглеродистые изделия MgO–10 % C	180	298
	60	307
Периклазоалюмоуглеродистые изделия MgO–10 % Al ₂ O ₃ –10 % C	180	289
	60	304
Алюмопериклазоуглеродистые изделия 75 % Al ₂ O ₃ –MgO–10 % C	180	286
	60	303
Периклазоизвестковоуглеродистые изделия 70 % MgO–CaO–7 % C	180	270
	60	295
Алюмопериклазовые изделия Al ₂ O ₃ –5–8 % MgO	180	256
	60	290
Алюмопериклазовый (алюмошпинельный) бетон Al ₂ O ₃ –4–6 % MgO	180	258
	170	260
	160	263
	60	291

Интенсивная замена в футеровке стен и дна MgO–C-изделий на MgO–Al₂O₃–C и Al₂O₃–MgO–C вызвана существенными преимуществами последних в части термомеханической устойчивости в службе. Алюмосодержащие огнеупоры имеют более низкий коэффициент линейного расширения, что сказывается на снижении напряжений в футеровке при знакопеременных изменениях ее температуры в процессе эксплуатации. Кроме того, теплопроводность алюмосодержащих огнеупоров ниже, ниже и модуль Юнга, что свидетельствует о более высокой термостойкости этих огнеупоров.

Для алюмосодержащих изделий этой группы характерно шпинелеобразование в рабочем слое футеровки в процессе взаимодействия Al₂O₃ и MgO при эксплуатации ковша с увеличением объема до 15 % (не всей футеровки, а ее доли, приходящейся на вновь образующуюся фазу). Процесс шпинелеобразования способст-

вует уменьшению открытой пористости, одновременно происходит уплотнение швов именно на стыке рабочих поверхностей изделий в зоне контакта рабочей поверхности футеровки с расплавом стали и шлака. Коррозионная стойкость также растет вследствие образования шпинели при работе с кальцийалюминатными шлаками. Al₂O₃–MgO–C огнеупоры широко используются в наиболее эрозионно напряженных зонах футеровки — в бойном месте футеровки дна СК. При этом следует учитывать, что для стали, раскисленной кремнийсодержащими раскислителями, наличие глинозема в составе огнеупора будет способствовать снижению стойкости футеровки. Наличие существенного количества [Ca] в металле также не способствует высокой стойкости футеровки алюмосодержащих стен. Отрицательно влияет на стойкость алюмосодержащих изделий и интенсивное использование плавикового шпата в качестве разжижителя шлака.

Монолитная безуглеродистая футеровка

Монолитная футеровка дна СК в России успешно вытесняет футеровку штучными изделиями, в том числе алюмопериклазоуглеродистыми. Основная причина — снижение удельного расхода огнеупоров и удельных затрат на огнеупоры на этом участке футеровки. Это локальная реализация технологии “непрерывной” (“бесконечной”) футеровки — технологии восстановления частично изношенной футеровки до ее первоначального состояния в процессе ремонта подливом.

Используются бетоны алюмошпинельного состава (см. табл. 1) в системе Al₂O₃–MgO. На выбор бетона влияют различные факторы, в пер-

вую очередь технология выплавки и разлива стали, оборачиваемость ковшей. Согласно технологии, реализованной фирмой VGH AG на многих предприятиях России, Украины, Италии, Германии, ремонт бетонного дна подливом осуществляется по мере необходимости во время замены огнеупоров шлакового пояса или продувочной фурмы и обязательно при замене стен, например, полная замена бетона в футеровке дна по практике, принятой в России, производится после 500–600 плавов (5–6 замен стен, выполненных из штучных огнеупорных изделий).

На этапе замены футеровки стен заменяется обычно 40–60 % огнеупорного материала изна-

чальной футеровки дна, которая имеет исходную толщину 250–350 мм. Такая технология в России впервые была реализована в ковшах КЦ ПАО “Северсталь”, а освоение технологии начинали фирмы: RHI, Австрия; VGH AG, Feuro, обе Германия; Vesuvius, Великобритания. Вначале участок в ковшовом отделении был организован по временной схеме. На сегодня это механизированный участок, все вопросы, связанные с логистикой использования ковшей, в том числе с достаточно длинным периодом сушки бетонного дна, решены организацией работ и наличием соответствующего парка оборудования. Технология применения бетона в дне СК к настоящему времени внедрена на большегрузных ковшах конвертерных цехов НЛМК, ММК, “Азовстали”, а также на ковшах ЭСПЦ ряда предприятий (ЗСМК РП, Северский трубный завод). В табл. 3 представлено сравнение удельных расходов бетона и штучных изделий на футеровку дна СК.

ТАБЛИЦА 3. СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ОГНЕУПОРОВ (кг/т стали) ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА МОНОЛИТНУЮ ФУТЕРОВКУ ДНА СТАЛЕРАЗЛИВНОГО КОВША

TABLE 3. DECREASE OF SPECIFIC CONSUMPTION OF REFRACTORIES (kg/t of steel) AT TRANSFER TO MONOLITHIC LINING OF STEEL LADLE BOTTOM

Емкость ковша	Футеровка штучными изделиями	Футеровка бетоном
375-т ковши в конвертерном производстве	0,615	0,280
150-т ковши в электро-сталеплавильном производстве	0,456	0,266

На СК емкостью 120–180 т интенсивно внедряется технология изготовления бетонных дна и стен (рис. 3).

На территории СССР технология изготовления бетонного дна и стен была освоена впервые на Белорусском металлургическом заводе (ЭСПЦ № 1) при участии фирм VGH AG и RHI. Технология используется и сегодня. В ее основе лежит технология “непрерывной” футеровки. Освоена эта технология в “НЛМК-Калуга”, на Надеждинском металлургическом заводе и на электрометаллургическом заводе в Тюмени, в стадии освоения технология находится в ККЦ-1 НЛМК и на Северском трубном заводе. На большинство из перечисленных предприятий фирма VGH AG предоставляет бетон и реализует инженеринговые услуги на протяжении длительного периода, в том числе передает методику минимизации удельного расхода огнеупорного бетона на мно-

гие предприятия в процессе освоения монолитной технологии. Сравнение удельных затрат на 1 т стали при футеровке периклазоуглеродистыми и алюмопериклазоуглеродистыми изделиями дна и стен СК с монолитной футеровкой бетоном (оценка согласно средневзвешенным рыночным ценам на огнеупорные материалы по состоянию на июль 2018 г.) с учетом ремонта бетонного дна и стен подливом 6 раз за кампанию (100 плавов) ковша приведено в табл. 4.

Рис. 3. 130-т сталеразливочный ковш, футерованный (дно и стены) бетоном, два канала под установку продувочных фурм и один — сталеразливочного стакана (установка снаружи)

Fig. 3. 130-ton steel ladle, lined by a concrete (bottom and walls), two channels for blow-down tuyere installation and one — for casting nozzle

Бетон в футеровке СК используют и в Европе, в том числе в производстве качественных сталей, в частности в Италии фирма VGH AG имеет в сервисном обслуживании, включая поставку бетона, СК на семи предприятиях, как металлургических, так и машиностроительных.

Следует отметить, что в Японии в конвертерном производстве на Kashima Steel Works (объем производства 4,5 млн т) с емкостью ковшей 345 т (сталь вакуумируется на установке RH) успешно эксплуатируется бетон в дне и стенах СК. При парке 24 СК в работе находятся 8–10 ковшей [4]. Используя лазерный профилемер, фиксируют остаточную толщину стен (не менее 50 мм) и подливают стены и дно, синхронизируя с заменой шлакового пояса и продувочной фурмы.

ТАБЛИЦА 4. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОГНЕУПОРНОГО БЕТОНА В РАБОЧЕЙ ФУТЕРОВКЕ ДНА И СТЕН 160-т СТАЛЕРАЗЛИВНОГО КОВША (ШЛАКОВЫЙ ПОЯС НЕ УЧИТЫВАЛСЯ)

TABLE 4. ESTIMATION OF ECONOMICAL EFFICIENCY OF REFRACTORY CONCRETE APPLICATION IN WORKING LINING OF BOTTOM AND WALLS OF 160-ton STEEL LADLE (SLAG ZONE NOT TAKEN INTO ACCOUNT)

Огнеупорный материал (стены и дно)	Экономические показатели (6 кампаний эксплуатации стальной ковша, 600 плавов — 9600 т стали)			
	масса огнеупорных материалов, т	средневзвешенная цена, тыс. долл/т	затраты на огнеупоры, тыс. долл.	удельные затраты, долл/т стали
Периклазоуглерод (MgO–10 % C)	109416	1,92	210080	2,19
Алюмопериклазоуглерод (70 % Al ₂ O ₃ –MgO–10 % C)	112800	1,61	181608	1,85
Алюмошпинельный бетон (Al ₂ O ₃ –5 % MgO)	66000	1,58	104280	1,06

Для огнеупорного алюмопериклазового бетона в системе Al₂O₃–MgO·Al₂O₃–MgO характерно положительное расширение в процессе нагрева, и это расширение носит линейный характер. Этот процесс — результат образования шпинели, который происходит непрерывно в процессе службы футеровки вблизи ее рабочей поверхности, что, с одной стороны, снижает напряжение внутри футеровки, где температура не достигла значений синтеза шпинели и расширение близко к нулю, и в то же время в приповерхностном слое рабочей футеровки, где идет синтез шпинели, объемное расширение материала сопровождается уплотнением текстуры. Уплотнение препятствует процессу пропитки огнеупорного материала шлаком. Тормозится взаимодействие шлака с материалом огнеупора с образованием легкоплавких соединений и замедляется коррозия огнеупорного материала.

Преимущества бетонных футеровок СК:

- высокая устойчивость к пропитке металлошлаковым расплавом, как следствие мелкопористой текстуры особенно на участке контакта с упомянутым расплавом, где 90 % пор имеют размер менее 5 мкм и из них большая часть имеет размер пор менее 1 мкм;
- отсутствие науглероживания металла от углерода из футеровки СК [2];
- увеличение продолжительности эксплуатации арматурного слоя футеровки в 2–2,5 раза [5];
- отсутствие необходимости применения гнездовых блоков как в сталевыпускном узле, так и для установки донной продувочной фурмы (см. рис. 1);
- отсутствие трещин в футеровке, размывов по швам, углам и ребрам изделий;

– снижение (остается только шлаковый пояс, в котором используются изделия на органическом связующем) количества выделений углеводородов (фенол, формальдегид, бенз-а-пирен) при сушке, разогреве и эксплуатации футеровки;

– экономия материалов, рабочего времени и рабочей силы при выполнении и уходе за футеровкой;

– снижение удельных расходов и удельных затрат на огнеупоры на 1 т стали.

Использование огнеупорного бетона позволяет получить еще один значимый эффект вследствие более низкой теплопроводности материала (см. табл. 2): при той же толщине огнеупорной футеровки температура на корпусе СК снижается; появляется возможность манипулировать в известных пределах толщиной рабочей футеровки СК, сохраняя стойкость футеровки; регулировать вместимость СК по жидкому металлу, что позволяет улучшить экономические результаты работы цеха. При необходимости можно увеличить величину свободного борта [3]. Для 200-т ковша уменьшение толщины рабочего слоя футеровки на 10 мм позволяет увеличить емкость ковша по наливу на 2,5 т стали. Кроме того, бетонная футеровка СК характеризуется существенно более низкими потерями тепла, чем обычные углеродсодержащие огнеупоры.

В докладе на совещании европейских металлургов по вопросам футеровок СК в Ганновере [5], представленном фирмой Voestalpine Linz, Австрия, где одновременно эксплуатируется в конвертерном цехе футеровка 180-т ковшей из углеродсодержащих изделий и бетонная (стены и дно), сообщается, что с точки зрения металлургических результатов отсутствует различие между кирпичной и бетонной футеровкой.

Безуглеродистые изделия

Для футеровки СК большой вместимости (от 250 т) в Китае, Европе и Японии широко используются алюмопериклазовые (алюмошпинельные) изделия. Применяются они и в Индии, и Китае на ковшах значительно меньшей емкости (60–180 т), так как обладают многими положительными качествами вышеупомянутых бетонов. В то же время для таких футеровок меньшую роль играют термомеханические напряжения, возникающие в монолитной футеровке ковша, в том числе при его перемещении с металлом с использованием крана. Изделиями легче компенсировать отклонения в геометрии ковша, которые являются следствием изменений геометрии металлического корпуса со временем.

Вопросы теории и практики, связывающие высокую коррозионную стойкость с химическим и фазовым составом, с текстурой огнеупорного бетона, изучены достаточно подробно. Они применимы и к изделиям аналогичного состава в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$. Установлено, что оптимальным с точки зрения формирования вторичной шпинели в рабочей зоне огнеупора является наличие 5–7 % MgO , при этом имеет место минимальная глубина пропитки огнеупора шлаком и лучшая коррозионная стойкость.

В то же время в технологии изготовления алюмопериклазовых изделий не используется высокоглиноземистый цемент и, соответственно, в матричной части отсутствует оксид кальция, который обычно отвечает через образование гексаалюмината кальция ($\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$) за процесс износа при использовании кальцийсодержащих шлаков, в том числе при внепечной обработке металла. Впоследствии это соединение по мере поступления в зону контакта CaO , SiO_2 из шлака трансформируется в более легкоплавкие соединения (например, $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$) с температурой плавления около 1360 °С. В трехкомпонентной системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--SiO}_2$ значительную долю поля диаграммы занимают соединения и твердые растворы с температурой плавления ниже 1500 °С. Легкоплавкий шлак ускоряет процесс износа огнеупора на основе Al_2O_3 , изначально содержащего CaO . В системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ изделия более устойчивы к воздействию каль-

цийалюминатных шлаков с низкой температурой плавления, чем бетоны. В то же время процесс шпинелеобразования вблизи рабочей поверхности характерен для этих изделий, как и для бетонов, что сопровождается уплотнением структуры, способствует их достаточно высокой стойкости.

Плюсом для апробации этих огнеупоров является отсутствие необходимости в специальном оборудовании (бетоносмеситель, шаблон), нет необходимости и в длительной сушке.

Стойкость стен СК, выполненных с использованием изделий в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$, не уступает стойкости футеровки стен из оксидоуглеродистых огнеупоров, как показывает практика металлургов Европы, Японии и Китая.

В то же время большая термодинамическая стабильность огнеупорного материала в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ по сравнению с периклазоуглеродистыми огнеупорами может помочь решить технологические задачи в металлургическом производстве. Например, по мнению авторов, корундопериклазовый огнеупор целесообразно использовать в производстве высококачественных трубных низколегированных малоуглеродистых сталей с низким содержанием серы, фосфора, азота, общего кислорода и с определенным соотношением C/S. Во время длительной внепечной обработки стали металл в ковше находится в перегретом состоянии и, соответственно, увеличивается время контакта с огнеупорным материалом. Важным становится низкий потенциал кислорода, присущий именно футеровке на основе Al_2O_3 , что способствует предотвращению вторичного окисления в процессе обработки металла [6]. В то же время, как известно, оксид магния в условиях вакуума или в нейтральной атмосфере уже при 1400 °С вступает в реакцию с углеродом ($\text{MgO} + \text{C} \rightarrow \text{Mg}\uparrow + \text{CO}\uparrow$) при этом $\text{Mg}\uparrow$ способен вступать в реакцию с $[\text{Al}]$ и $[\text{O}]$, растворенными в стали, с образованием шпинельсодержащих ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) неметаллических включений [7]. Роли шпинельсодержащих включений в трубном металле посвящен значительный объем отечественной технической литературы.

Периклазоизвестковоуглеродистые изделия

На одном из металлургических заводов России в стенах, дне и в шлаковом поясе 65-т ковша успешно используются термообработанные периклазоизвестковоуглеродистые (по евроклассификации — доломитомagneзиальноуглеродистые) огнеупоры поставки VGH AG, стойкость 75–80 плавок. 20–25 лет назад на многих металлургических предприятиях было свое огнеупорное производство, основной продукцией кото-

рого были известковопериклазовые безобжиговые огнеупоры, это производство исчезло с появлением периклазоуглеродистых огнеупоров. Новое поколение огнеупоров на основе обожженного доломита радикально отличается от пескосвязанных изделий прошлого, технология производства плотного клинкера с минимальным содержанием примесей позволила использовать недефицитные доломиты соответствующего ка-

чества в производстве огнеупоров высокого качества. Производство продукции в системе $MgO-MgO-CaO-C$ организовано на многих предприятиях Южной Европы, Китая, Турции, Ирана и других стран. Изделия периклазоизвестковоуглеродистого состава широко используются в Южной Европе, Турции, Иране, Китае и Северной Африке. Причем изделия имеют различное содержание MgO и углерода.

Проблема сохранности изделий (предотвращение процесса гидратации оксида кальция) решена использованием вакуумной упаковки из двухслойной фольги.

В этих огнеупорах потребителя привлекает в первую очередь сравнительно низкая цена (низкие удельные затраты на 1 т стали), хотя есть и технические преимущества: более высокая стабильность по сравнению с периклазосодержащими изделиями в восстановительной среде и вакууме в сочетании с высокой устойчивостью к основным шлакам. В Турции, на юге Европы, в Китае в электросталеплавильных цехах с печами до 250 т зачастую используют периклазоизвестковоуглеродистые огнеупоры в рабочей футеровке стен в зоне металла и дна.

Выводы

1. В футеровке шлакового пояса СК безальтернативно используются периклазоуглеродистые огнеупоры на основе высококачественного плавного периклаза и 12–15 % C.

2. При том что $MgO-C$ -огнеупоры в стенах являются универсальным огнеупорным материалом с точки зрения использования тех или иных раскислителей или добавок и модификаторов,

существуют и иные решения, так как в конкретных случаях другие схемы футеровки менее затратны и более безопасны.

3. Использование огнеупорных бетонов и изделий алюмопериклазового (алюмошпинельного) состава, периклазодоломитовых изделий в футеровке СК эффективно как с технической, так и с экономической точки зрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксельрод Л.М. Черная металлургия, огнеупорные материалы. Реальность и прогнозы // Новые огнеупоры. 2017. № 12. С. 3–12.
2. Li S., Zhang H., Li X. etc. Comparative analysis on new type carbon free lining and traditional carbon containing lining applied on 120-ton LF-RH refining ladles // China's Refractories. 2017. V. 26. № 2. P. 35–38.
3. Buhr A., Bruckhausen R., Fahndrich R. The steel industry in Germany – trends in clean steel technology and refractory engineering // Refractories WORLDFORUM. 2016. № 1. P. 57–63.
4. Ishikawa A., Sato M., Kanai T. Improvement of siderwall castable for steel ladles at Kashima Steel Works // Unitecr-2017, proceeding 0121.
5. Exenberger R. Steel Ladle Lining at Voestalpine Stahl, Linz // 7th International Symposium Refractory Technology: Steel Ladle Lining, 4–6 september 2012, Hannover, Germany.
6. Nayak J.P., Ghosh B., Tsuyuguchi K. etc. Development of high performance spinel brick for steel ladle applications // Unitecr-2015, proceeding 162.
7. Кушнерев И.В., Серов Г.В., Тихонов С.М. и др. Прогнозирование состава и количества неметаллических включений при производстве низколегированных трубных марок стали // Новые огнеупоры. 2017. № 12. С. 36–41.

Поступила 20 сентября 2018 г.

REFERENCES

1. Akselrod L.M. Steel industry, refractory materials. Reality and forecasts. *Novye огнеупоры*, 2017, no. 12, pp. 3–12. (In Russ.).
2. Li S., Zhang H., Li X. etc. Comparative analysis on new type carbon free lining and traditional carbon containing lining applied on 120-ton LF-RH refining ladles. *China's Refractories*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 35–38.
3. Buhr A., Bruckhausen R., Fahndrich R. The steel industry in Germany – trends in clean steel technology and refractory engineering. *Refractories WORLDFORUM*, 2016, no. 1, pp. 57–63.
4. Ishikawa A., Sato M., Kanai T. Improvement of siderwall castable for steel ladles at Kashima Steel Works. *Unitecr-2017, proceeding 0121*.
5. Exenberger R. Steel Ladle Lining at Voestalpine Stahl, Linz. *7th International Symposium Refractory Technology: Steel Ladle Lining, 4–6 september 2012, Hannover, Germany*.
6. Nayak J.P., Ghosh B., Tsuyuguchi K. etc. Development of high performance spinel brick for steel ladle applications. *Unitecr-2015, proceeding 162*.
7. Kushnerev I.V., Serov G.V., Tikhonov S.M. etc. Forecasting of composition and amount of non-metallic inclusions at low-alloyed pipe steel grades production. *Novye огнеупоры*, 2017, no. 12, pp. 36–41. (In Russ.).

Received September 20, 2018