

Ашраф Ханна¹ (✉), Карл-Михаэль Цеттль²¹ RHI Canada Inc., подразделение Сталь, г. Берлингтон, Канада² RHI AG, подразделение Сталь, г. Вена, Австрия

УДК 666.762.32.043.1:621.365.22(71)(436)

СОВРЕМЕННЫЙ ПРОЦЕСС ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНЦЕПЦИЙ ИХ ФУТЕРОВКИ*

ВВЕДЕНИЕ

С начала 1980-х годов процесс выплавки стали в электродуговых печах (ДСП) постоянно совершенствовался и достиг впечатляющих результатов с точки зрения производительности и удельного расхода электроэнергии. Для оптимизации процесса эксплуатации ДСП принимался ряд мер, включающих экономию и повторное использование энергоресурсов, а также более активное использование химической энергии в сочетании с хорошим вспениванием шлака. В мире наблюдается тенденция к увеличению вдувания кислорода и углерода. В современных ДСП многофункциональные инструменты для инъекции кислорода стали нормой, ими также модернизируют старые ДСП. Кроме того, снижение цены природного газа в Северной Америке приведет к более широкому использованию железа прямого восстановления в качестве чистого источника железа для ДСП. С внедрением таких инструментов, материалов и технологий возникла необходимость в разработке и корректировке концепций футеровки печей с тем, чтобы обеспечить стойкость футеровки в среде с высоким содержанием кислорода, высоким содержанием FeO в шлаке, а также с существенной тепловой и механической нагрузкой на футеровку. В настоящей статье рассмотрены результаты последних усовершенствований в области процесса выплавки стали в ДСП, влияние использования железа прямого восстановления на футеровку ДСП, а также результаты разработок, рассчитанных на жесткие условия эксплуатации.

* Статья первоначально была представлена на конференции «Технологии производства чугуна и стали» AISTech 2014. Печатается с разрешения Ассоциации производителей чугуна и стали (AIST).



Ашраф Ханна
E-mail: ashraf.hanna@rhi-ag.com

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ДСП

ДСП являются наиболее усовершенствованными сталеплавильными агрегатами, в которых электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию для нагрева и плавления металла. Процесс выплавки стали в ДСП имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами производства стали. Это единственный процесс, при котором можно достичь очень высоких температур (до 2000 °С) и работать с высокоосновным шлаком [1].

Главная особенность ДСП по сравнению с другими сталеплавильными агрегатами в том, что тепло в ней генерируется за счет электрической энергии, а не в результате сжигания топлива [2]. Поскольку электроэнергия стала более конкурентоспособной, производство стали в ДСП расширилось обычными марками углеродистой стали. Это изменение произошло в конце 1940-х годов, когда производители стали, которые стремительно наращивали объемы производства во время войны, искали способы использования простаивающего оборудования. Постепенно в ДСП начали выплавлять марки стали, которые раньше производились в основном в мартеновских печах. В 1983 г. 73,4 % всей стали, произведенной в ДСП, составляла углеродистая сталь, 19,6 % — легированная, 6,9 % — нержавеющая. Так как ДСП и кислородные конвертеры стали постепенно вытеснять мартеновский процесс выплавки стали, годовой объем производства увеличился, и в 2013 г. в США более 58 % нерафинированной стали было произведено в ДСП.

Благодаря недавнему падению цен на природный газ в США металлурги планируют увеличить его использование для производства стали и применяют режим эксплуатации ДСП больше за счет химической энергии, чем электрической. Поэтому все больше ДСП оснащаются горелками и инжекторами. Кроме того, снижение цен на природный газ способствует более экономному производству за счет железа прямого восстановления (ЖПВ), более широкое

использование которого является новой тенденцией в сталелитейной промышленности США.

ГОРЕЛКИ И ИНЖЕКТОРЫ

Современный процесс выплавки стали в ДСП ориентирован на максимально эффективное использование электрических и альтернативных источников энергии. Для растущей потребности в эксплуатационной гибкости и повышении эффективности ДСП необходима разработка простых и надежных устройств, обеспечивающих высокую производительность [3]. Система состоит из инжекторов и горелок, установленных на ДСП (рис. 1). Каждый инжектор состоит:

>> из кислородного инжектора с функцией кислородно-газовой горелки, установленного на водоохлаждаемом керамическом блоке и оснащенного обратными клапанами на трубах подачи газа и кислорода, гибкими шлангами подачи

воды, кислорода (на фурму и горелку) и природного газа, а также двухпозиционными клапанами (рис. 2, 3);

>> из углеродного инжектора с функцией кислородно-газовой горелки, установленного на водоохлаждаемом керамическом блоке и оснащенного обратными клапанами на трубах подачи газа и кислорода, гибкими шлангами подачи воды, кислорода (на фурму и горелку) и природного газа, а также двухпозиционными клапанами. Необходимо также гибкое соединение для системы продувки углеродом;

>> из водоохлаждаемой защитной панели, состоящей из водоохлаждаемого медного экрана, который крепится к кожуху печи, а также керамического блока для кислородного инжектора, который крепится к медному экрану. Кислородный инжектор смонтирован в керамическом блоке.

Инжекторы должны быть установлены снаружи ДСП и направлены таким образом, чтобы

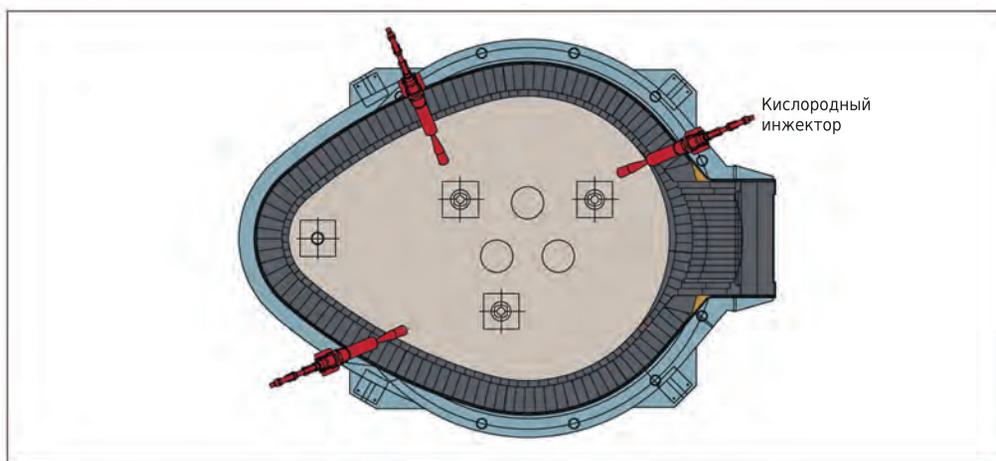


Рис. 1. Кислородные инжекторы в ДСП

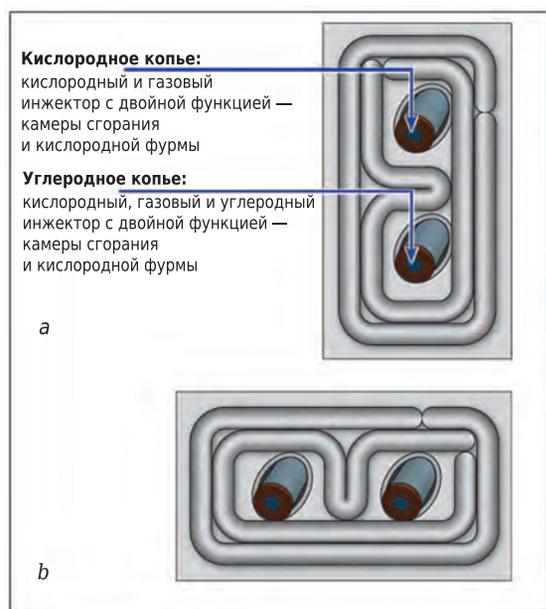


Рис. 2. Схема углеродного и кислородного копы: *a* — вертикальное положение; *b* — горизонтальное

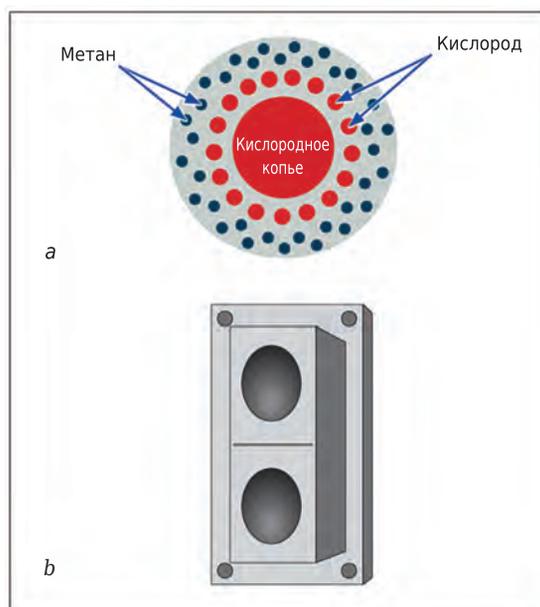


Рис. 3. Кислородное копьё (*a*) с отверстиями для кислорода и метана и водоохлаждаемый блок (*b*)

сверхзвуковой поток кислорода (вдувается через кислородное копьё) пересекался с потоком углерода (вдувается через углеродное копьё) под заранее установленным углом и на определенном расстоянии от ванны металла.

Углеродные и кислородные инжекторы установлены рядом друг с другом (см. рис. 2, а, b). Такая конфигурация используется для инжекторов, находящихся в зоне выпуска, так как при наклоне печи для выпуска металла жидкий металл достигает верха стены. Поэтому для покрытия большой площади, находящейся в контакте с жидким металлом, используется футеровка (рис. 4). Так как инжекторы должны быть смонтированы в водоохлаждаемые панели, а не в огнеупоры, то они должны быть установлены горизонтально [2].

Правильная установка инжектора под заданным углом имеет важное значение для его эффективной работы. Необходимо контролировать точку пересечения кислорода и угольной пыли и избегать всплесков шлака и/или износа огнеупоров. Оптимальная точка пересечения находится в слое шлака на уровне около 200 мм над уровнем ванны металла. Толщина слоя шлака составляет около 400 мм, и точка пересечения находится в середине этого слоя. Если точка пересечения находится слишком близко к ванне металла, есть вероятность повышенного окисления металла. Реакция железа с кислородом приводит к образованию оксида железа (FeO), что повышает выход металла и в то же время агрессивность жидкого шлака, увеличивая тем самым интенсивность коррозии футеровки стен ДСП. Если точка пересечения находится слишком высоко над уровнем металла, это приводит к всплескам шлака в области стен и свода и влечет за собой повышенную коррозию огнеупоров. На рис. 5 показан оптимальный угол расположения инжекторов. Однако в условиях эксплуатации этот угол настраивают неоднократно для устранения разбрызгивания шлака, уменьшения коррозии и механического износа огнеупоров.

АГРЕССИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КИСЛОРОДНОГО КОПЬЯ НА ФУТЕРОВКУ ДСП

Огнеупоры в зоне действия кислородного копьё находятся в очень агрессивной среде и подвержены:

- >> механическому износу или вымыванию вследствие сверхзвуковой скорости кислорода;
- >> высокому тепловому напряжению в результате экзотермической реакции окисления;
- >> обезуглероживанию и окислению углерода, содержащегося в MgO–C-огнеупорах, под воздействием инжекторов;
- >> химическому воздействию агрессивного шлака с высоким содержанием FeO и низкой вязкостью.

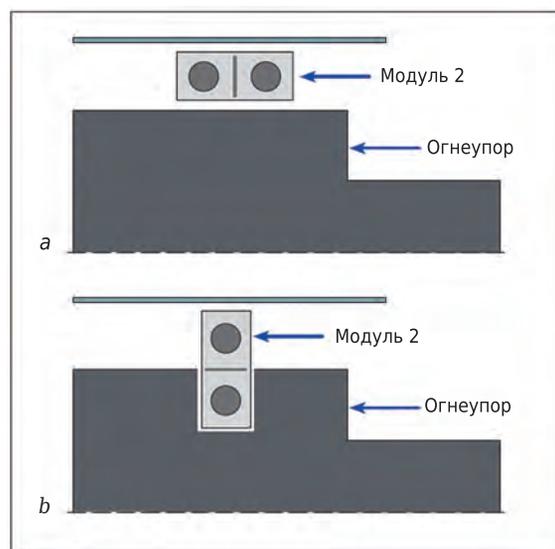


Рис. 4. Правильное горизонтальное положение инжекторов (а) в зоне выпуска. Установка инжекторов в футеровку в вертикальном положении невозможна (b)



Рис. 5. Угол расположения углеродного и кислородного копьё в ДСП по отношению к уровню металла

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗА ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ (ЖПВ) В ДСП

Использование ЖПВ или горячбрикетированного железа может иметь специфическое воздействие на процесс выплавки стали. Так, потребление энергии, производительность и выход годного зависят от химического состава и содержания ЖПВ в загружаемом ломе, а также от технологического режима [4]. ЖПВ используется в качестве замены лома, а также для растворения примесей, содержащихся в ломе. При увеличении содержания ЖПВ снижается не только коли-

чество примесей, но и, что не менее важно, содержание азота, и при этом сохраняется вспенивание шлака. Уменьшение содержания азота позволяет электросталеплавильным предприятиям, которые производят слябы для стана горячей прокатки штрипса или заготовки для проволочно-прокатного стана, успешно конкурировать с доменными и конвертерными производствами в области различного применения продукции.

Уровень металлизации ЖПВ влияет на расход огнеупоров. Чем ниже металлизация, тем выше содержание FeO. Кроме того, поскольку увеличение содержания SiO₂ в ЖПВ влияет на основные MgO–С-огнеупоры, то для поддержания основности необходимо добавление извести. При этом и SiO₂ в ЖПВ, и обожженная известь требуют больших затрат энергии в процессе выплавки стали. Кроме того, содержание фосфора и серы может отрицательно влиять на расход огнеупоров в связи с процессом рафинирования, который в некоторых случаях требует повышения температуры и увеличения подачи кислорода. Загрузка в ДСП 20–35 % ЖПВ всего объема металлической шихты, как правило, негативно влияет на производительность, стойкость огнеупоров,

расходные материалы, длительность работы печи и потребление энергии.

Использование ЖПВ может негативно отразиться на футеровке ДСП, а именно:

>> ЖПВ может повысить содержание FeO в шлаке, что влечет за собой коррозию при взаимодействии с рабочим слоем футеровки и набивной массой подины;

>> по сравнению с ломом ЖПВ имеет высокую плотность, что приводит к горению дуги в открытой ванне. Дуга создает всплески металла наряду с очень высокой температурой плазмы, направленной к стене ДСП, что приводит к тепловому стрессу и механическому износу (рис. 6);

>> кислотные оксиды, содержащиеся в ЖПВ (например, SiO₂ и P₂O₅), могут усилить химическое воздействие на основные MgO–С-огнеупоры;

>> скопление налипаний металла в ДСП может привести к возникновению сколов;

>> длительные межплавочные простои снижают общую стойкость огнеупоров.

Ниже описаны доступные решения для уменьшения износа футеровки, связанного с разными условиями эксплуатации.

ОГНЕУПОРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ НА УГЛЕРОДНОЙ СВЯЗКЕ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ СТЕН ДСП

В связи с агрессивным составом шихты и изменяющимся соотношением мелкого скрапа, пустой породы и FeO возникла необходимость в усовершенствовании дизайна футеровки ДСП. Так как новая технология кислородного дутья делает процесс эксплуатации печи похожим на конвертерный, компания RHI использовала для футеровки ДСП огнеупорные изделия не на смоляной связке, а на углеродной, которые используют в основном для футеровки конвертеров. Общее сравнение показателей огнеупоров на углеродной и смоляной связках приведено в табл. 1. Как правило, теплопроводность изделий на углеродной связке ниже, чем на смоляной, что, в свою очередь, снижает тепловую нагрузку на кожу ДСП [5].

Сравнение фактического износа огнеупоров на углеродной и на смоляной связках по зонам ДСП на заводе Арселор Миттал Point Lisas (AMPL) приведено в табл. 2. Видно, что снижения скоро-

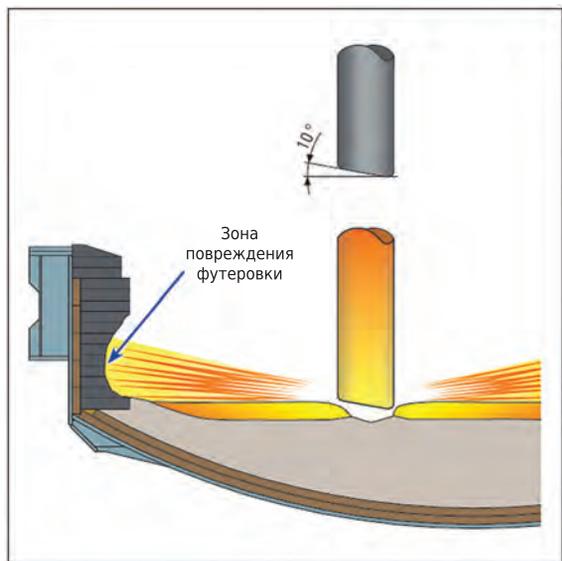


Рис. 6. Разрушительное воздействие на футеровку при завалке ЖПВ в ДСП

Таблица 1. Сравнение показателей огнеупоров на углеродной и смоляной связках

Показатель	Углеродная связка	Смоляная связка
Теплопроводность	++	+++
Тепловое расширение	++	++ (без металлических добавок) ++++ (с металлическими добавками)
Предел прочности при сжатии:		
в холодном состоянии	+++	++++
при высокой температуре (1000 °C)	++++	+++
Стойкость к коррозии	++++ (повышенное содержание углерода или металлические добавки не требуются)	++++ (без металлических добавок) ++ (с металлическими добавками) (требуется повышенное содержание углерода)
Термостойкость	++++	++
Стойкость к окислению	++++	++ (без металлических добавок) ++++ (с металлическими добавками)

Таблица 2. Сравнение скорости износа огнеупоров на углеродной и смоляной связках по зонам ДСП на заводе AMPL

Зона	Скорость износа, мм/плавку, огнеупора на связке	
	углеродной	смоляной
Угольной и кислородной фурм	1,4–2,3	1,0–1,7
Эркерный донный выпуск	1,3	1,0
Фаз	1,52–2,16	1,0–1,7
Шлаковый пояс	1,15–1,70	0,9–1,3

сти износа можно достичь за счет использования изделий на углеродной связке, благодаря которым повышается стойкость футеровки печи.

ОГНЕУПОРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ, СПЕЦИАЛЬНО РАЗРАБОТАННЫЕ ДЛЯ ЗОНЫ ГОРЕЛОК И КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ ДСП

Футеровка в зоне воздействия кислородного инжектора подвержена сильному механическому износу из-за сверхзвукового потока вдуваемого кислорода, а также износу вследствие окисления углерода в огнеупорных изделиях, химическому воздействию шлака и повышенной тепловой нагрузке в результате экзотермических реакций, идущих при окислении. В связи с этим возникает

необходимость проведения ремонта в зонах износа методом подварки, что связано с затратами, так как требуются остановки ДСП и привлечение персонала для работы в горячей печи. По этой причине были разработаны огнеупорные изделия с хорошо отрегулированным составом антиоксидантов и достаточно высоким содержанием углерода, выдерживающие термомеханические нагрузки. Технологическим центром компании RHI в Леобене (Австрия) для зоны горелок ДСП были разработаны MgO–C-огнеупоры, названные «суперогнеупорами». В этих огнеупорах на основе высококачественного плавленного периклаза в качестве антиоксиданта был использован карбид бора. Такие огнеупоры предлагаются как на углеродной, так и на смоляной связке. Карбид бора обладает прекрасными антиокислительными свойствами и в сочетании с обычно используемыми металлическими порошками Al и Mg повышает стойкость огнеупора (рис. 7). Карбид бора вступает в реакцию с мелкими компонентами оксида в матрице, формируя вязкие низкотемпературные легкоплавкие фазы с температурой плавления от 1000 до 1300 °С. Эти фазы образуют защитную пленку, которая покрывает стенки пор и компоненты углерода, снижая тем самым воздействие кислорода [6].

Разные марки горелочных изделий для ДСП, приведенных в табл. 3, были протестированы на

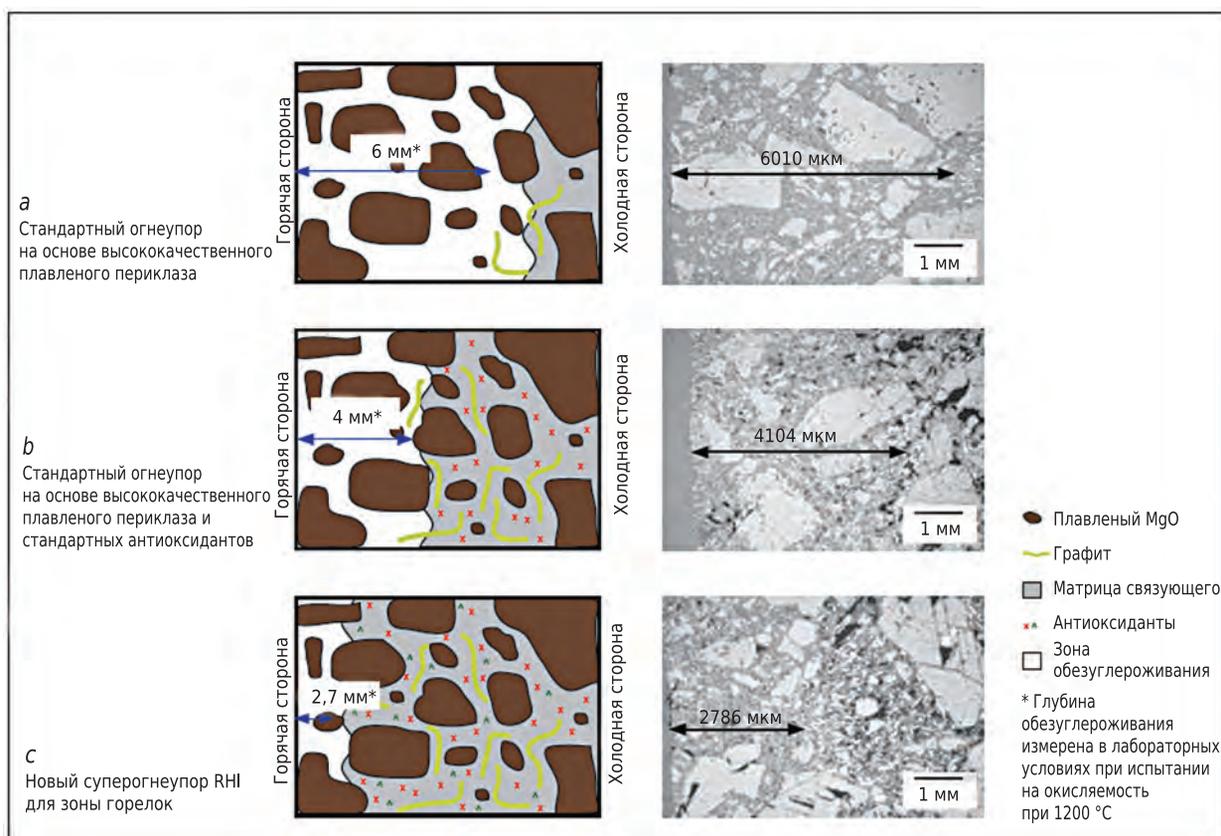


Рис. 7. Сравнение глубины окисления MgO–C-огнеупоров. Окисление углеродсодержащих компонентов приводит к повышению пористости матрицы с горячей стороны. Глубина обезуглероживания показана стрелками: а — без антиоксидантов; б — со стандартными антиоксидантами; с — с добавкой В₄С в сочетании с порошками Al и Mg

Таблица 3. Обзор имеющихся марок горелочных изделий для ДСП

Марка	Связующее	Страна производства
SYNCARBON C F1T10MBD	Углерод, дополнительное уплотнение	Европа
SYNCARBON C F1T10MB	Углерод	»
SYNCARBON R F1T10MB	Смола	»
ANCARBON F1T10MB	»	Китай

более чем 40 электросталеплавильных заводах по всему миру и доказали свою эффективность.

ОГНЕУПОРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ, СПЕЦИАЛЬНО РАЗРАБОТАННЫЕ ДЛЯ ЗОНЫ ФАЗ ДСП

Несмотря на то что огнеупоры на углеродной связке без добавки антиоксидантов демонстрируют хорошие шлакоустойчивость и стойкость к химическому воздействию, компания RHI провела множество исследований для изучения эффективности этих изделий в очень агрессивной среде. По результатам серии лабораторных и промышленных испытаний была разработана специальная высокопроизводительная марка огнеупора на углеродной связке на основе высококачественного плавленого периклаза с содержанием углерода 15 мас. % и особыми металлическими добавками. Для достижения

устойчивости к максимальным температурам, а также к высокотемпературной коррозии и эрозии эта марка огнеупора имеет обогащенную углеродом матрицу с дополнительной пропиткой специальным полимером (рис. 8). Введение антиоксидантов в огнеупоры на углеродной связке, как правило, является сложным процессом, однако такие огнеупоры демонстрируют очень высокую стойкость, особенно в зоне фаз ДСП. Огнеупоры марки SYNCARBON C F1T15SX, произведенные в Европе, протестированы более чем на десяти сталеплавильных предприятиях по всему миру, в том числе в таких ДСП, в которых объем ЖПВ достигает 90 %, а содержание FeO в шлаке в некоторых случаях 65 мас. %. По сравнению со стандартными огнеупорами для аналогичной области применения огнеупоры SYNCARBON C F1T15SX продемонстрировали значительно более высокую производительность. Высокоэффективными являются также огнеупоры марки ANCARBON F1T14D для зоны фаз ДСП, произведенные в Китае. Они изготовлены на основе высококачественного плавленого периклаза с содержанием углерода 14 мас. % с использованием технологии уплотнения.

ДИЗАЙН ФУТЕРОВКИ ПОДИНЫ ДСП

Использование ЖПВ и интенсивная эксплуатация с длинной дугой обуславливают повышенную температуру в зоне подины ДСП, поэтому

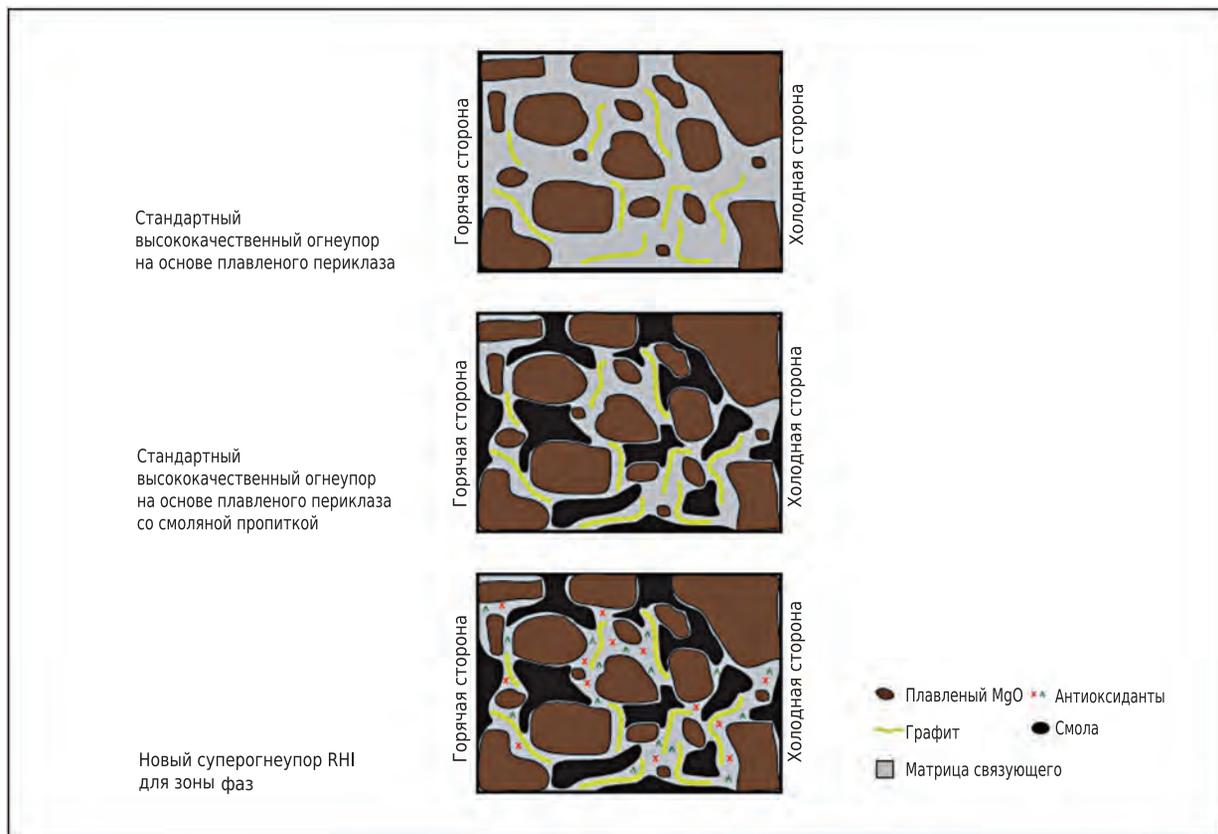


Рис. 8. Сравнение стандартных огнеупоров для зоны фаз ДСП с огнеупорами марки SYNCARBON C F1T15SX

теплоизоляционные свойства подины играют все более важную роль наряду с задачей снижения потребления электроэнергии и теплопотерь. Существуют различные схемы футеровки подины. На рис. 9 показаны три избранные схемы футеровки для первоначальной толщины подины 800 мм от верхней поверхности кожуха до верхней поверхности набивного слоя.

Расчеты теплопередачи были выполнены для случаев, показанных на рис. 9, с учетом

износа подины ДСП. На рис. 10 показаны разная расчетная температура, а также минимально возможная толщина подины. Результат увеличения толщины защитного слоя — повышение тепловой нагрузки на кожух ДСП. Выбор дизайна подины влияет на дальнейшую эксплуатацию ДСП, энергоэффективность, эффективность материалов и безопасность. В табл. 4 изложены различные факторы такого влияния.



Рис. 9. Сравнение разных дизайнов футеровки подины сразу после начала кампании ДСП

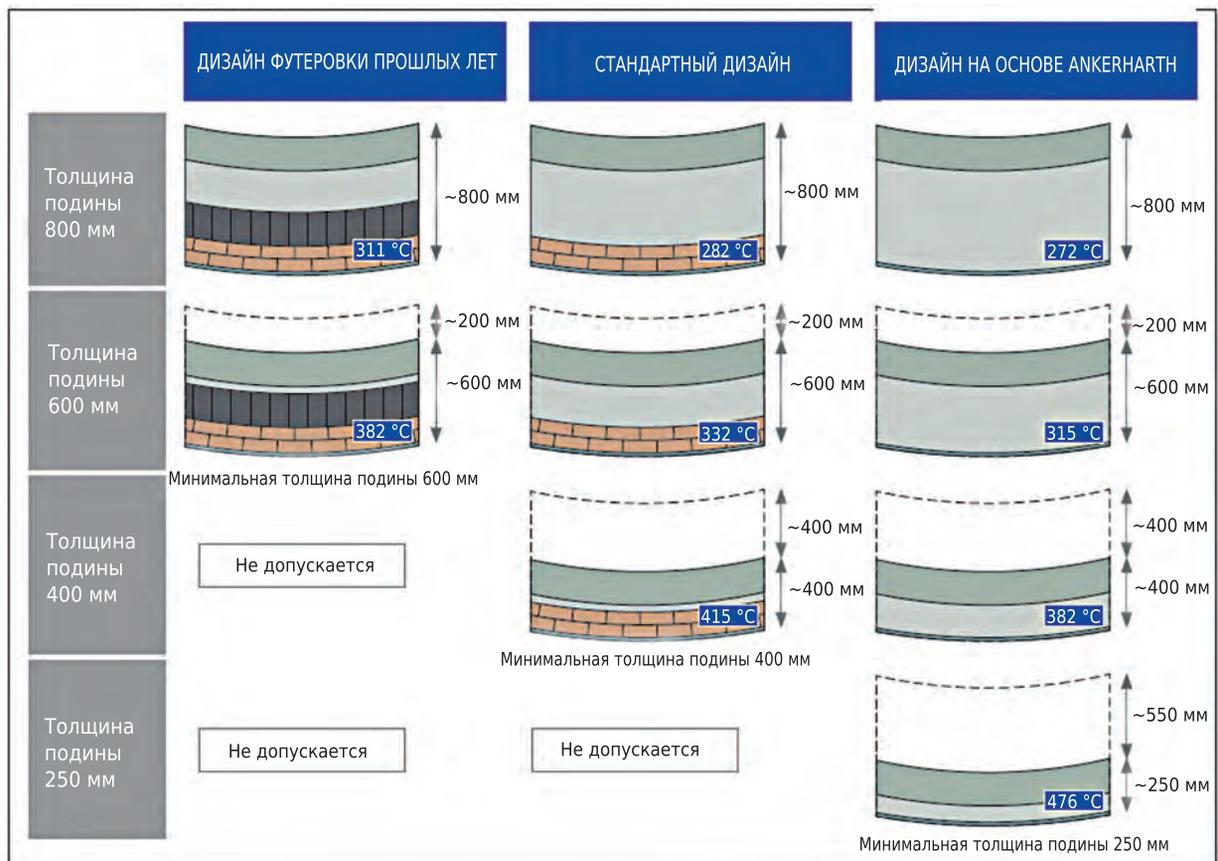


Рис. 10. Расчетная температура кожуха печи при температуре ванны металла 1650 °C и при разной минимальной толщине подины (на примере трех дизайнов футеровки)

Таблица 4. **Различные факторы в зависимости от выбранного дизайна подины ДСП**

	Дизайн футеровки прошлых лет	Стандартный дизайн	Дизайн на основе ANKERHARTH
Особенности эксплуатации	<ul style="list-style-type: none"> >> Возможны только короткие кампании печи без ремонта подины (ограниченная максимальная глубина износа) >> Увеличение затрат на техническое обслуживание и сокращение интервала между ремонтами ведет к увеличению простоя >> Возможна эксплуатация только с низким «болотом», что ведет к снижению производительности и увеличению времени между выпусками 	<ul style="list-style-type: none"> >> Возможны длительные кампании без ремонта подины (большая максимальная глубина износа) >> Снижение затрат на техническое обслуживание и увеличение интервала между ремонтами ведет к уменьшению простоя >> Благодаря работе с высоким «болотом» достигается высокая производительность и сокращается время между выпусками 	<ul style="list-style-type: none"> >> Возможны очень длительные кампании без ремонта подины (очень большая максимальная глубина износа) >> Низкие затраты на техническое обслуживание и большой интервал между ремонтами ведет к значительному уменьшению простоя >> Возможна работа с очень высоким «болотом», благодаря которой достигается очень высокая производительность и значительно сокращается время между выпусками
Энергоэффективность	<ul style="list-style-type: none"> >> Высокая теплопроводность MgO-C-огнеупоров ухудшает теплоизоляционные свойства и приводит к большим потерям энергии 	<ul style="list-style-type: none"> >> Низкая теплопроводность ANKERHARTH улучшает теплоизоляционные свойства и снижает энергопотери 	<ul style="list-style-type: none"> >> Низкая теплопроводность ANKERHARTH улучшает теплоизоляционные свойства и снижает энергопотери
Эффективность материала	<ul style="list-style-type: none"> >> Большие потери материала ANKERHARTH в связи с малым интервалом между ремонтами. Весь слой ANKERHARTH (200 мм) необходимо заменить после износа всего лишь 200 мм >> Коэффициент эффективности материала 50 % >> При склеивании слоя MgO-C-огнеупора со спеченным слоем ANKERHARTH возникает необходимость замены слоя MgO-C 	<ul style="list-style-type: none"> >> Снижение потерь материала за счет увеличения интервала между ремонтами. Спеченный слой ANKERHARTH (200 мм). Замена после износа ~400 мм >> Коэффициент эффективности материала 67 % 	<ul style="list-style-type: none"> >> Незначительные потери материала благодаря большому интервалу между ремонтами. Спеченный слой ANKERHARTH (200 мм). Замена после износа < 550 мм >> Коэффициент эффективности материала 73 %
Трудозатраты на футеровку	<ul style="list-style-type: none"> >> Требуются большие трудозатраты для выполнения футеровки слоя MgO-C и арматурного слоя 	<ul style="list-style-type: none"> >> Приблизительно один раз в год необходима замена арматурного слоя 	<ul style="list-style-type: none"> >> Особые трудозатраты на футеровку не требуются
Безопасность	<ul style="list-style-type: none"> >> Непропорциональная безопасность (не требуется) 	<ul style="list-style-type: none"> >> Очень высокий уровень безопасности. Дизайн хорошо себя зарекомендовал 	<ul style="list-style-type: none"> >> Необходимы стабильные технологические условия >> Осуществлять мониторинг подины и своевременно выводить ДСП из эксплуатации >> Требуются высокая надежность и высочайшее качество набивной массы для подины

При все более широком использовании ЖПВ в сочетании с работой ДСП на высокой мощности и длинных дугах становится необходимым использование набивной массы с пониженной

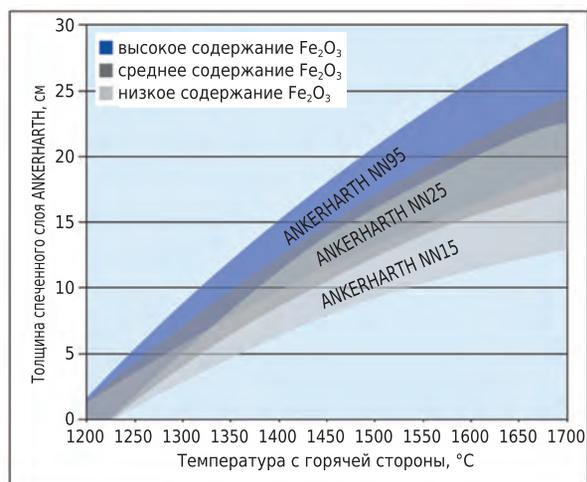


Рис. 11. Влияние температуры с горячей стороны на толщину спеченного слоя набивной массы ANKERHARTH различных марок с разным содержанием Fe₂O₃ [7]

спекаемостью и формированием тонкого слоя спеченного материала с горячей стороны. На рис. 11 показана спекаемость набивной массы RH1 различных марок для подины [7]. Основными факторами, влияющим на толщину спеченного слоя, являются содержание Fe₂O₃, а также количество примесей, образующих низкие фазы плавления в ходе эксплуатации (например, SiO₂ и Al₂O₃). Кроме того, высокое содержание CaO в массе для набивки подины необходимо для нейтрализации проникающего SiO₂, особенно для случаев шлакообразования в ДСП с загрузкой ЖПВ. Оптимальное содержание CaO в набивной массе способствует затвердеванию шлака, который уже проник в верхний слой огнеупора ANKERHARTH, и препятствует его дальнейшей инфильтрации. Таким образом, коррозионное воздействие шлака может быть сведено до минимума. Еще одним показателем шлакоустойчивости является соотношение CaO/SiO₂ в набивной массе для подины. Чем оно выше, тем более устойчива масса к воздействию агрессивного шлака, возникающего в результате применения ЖПВ.

ANKERROCS — СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЗА ОГНЕУПОРАМИ ФУТЕРОВКИ СТЕН ДСП

В связи с высокой скоростью износа футеровки в результате негативного воздействия ЖПВ и кислородных инжекторов существует необходимость в точных методах измерения фактической толщины футеровки без огромных капиталовложений (лазерное сканирование). Компания RHI разработала ANKERROCS (система наблюдения и контроля за огнеупорами) — индикатор оста-

точной толщины футеровки, который легко устанавливается непосредственно в футеровке агрегата (рис. 12). ANKERROCS устанавливается, как и любое другое огнеупорное изделие, но за счет особой конструкции профиль его поперечного сечения меняется в зависимости от степени износа (рис. 13). Средний сегмент постепенно уменьшается, и по нему определяется степень износа рабочего слоя футеровки. В процессе эксплуатации стыки сегментов ANKERROCS поблескивают, в результате чего отдельные сечения могут быть видны по мере износа (рис. 14).

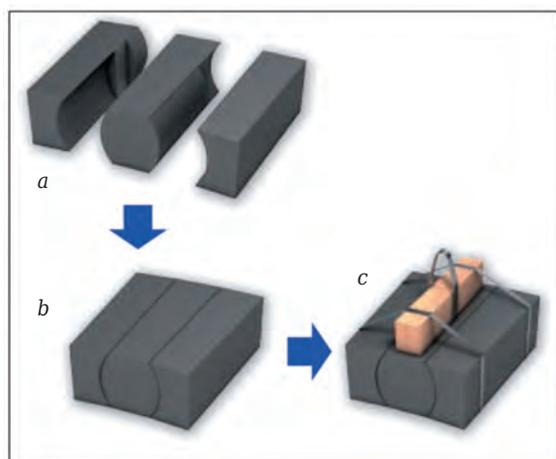


Рис. 12. ANKERROCS: *a* — специальные форматы изделий; *b* — комплект из сборных сегментов; *c* — удобные подъемные приспособления для установки



Рис. 13. Изменение сечения индикатора ANKERROCS по мере износа



Рис. 14. Вид ANKERROCS в процессе эксплуатации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные технологии эксплуатации ДСП и использование ЖПВ негативно влияют на стойкость как периклазоуглеродистых огнеупоров, так и масс для набивки подины. Что касается рабочего слоя футеровки, то для зон повышенного износа было разработано новое поколение периклазоуглеродистых огнеупоров на углеродной связке со значительно сниженной открытой пористостью и повышенной устойчивостью к высо-

ким температурам. Кроме того, были разработаны специальные марки огнеупоров для службы в среде с высоким содержанием кислорода и под воздействием агрессивного шлака; испытания огнеупоров дали положительные результаты. Новые марки огнеупоров на основе европейского магнезиального сырья характеризуются отличной устойчивостью к воздействию высоких температур и шлака благодаря крупным кри-

сталлам периклаза, низкому содержанию кремнезема и добавок специальных антиоксидантов. Кроме того, для оптимизации процесса выплав-

ки стали в ДСП были разработаны специальные решения по футеровке подины, а также простой в применении индикатор износа футеровки.

Библиографический список

[1] **Polukhin, P.** Metal process engineering / P. Polukhin, B. Grinberg, S. Kantenik, V. Zhadan, D. Vasilyev. — Moscow : Mir Publishers, 1970.

[2] **Hanna, A.** Electric energy saving in electric arc furnace steelmaking, Master's Thesis / A. Hanna. — Egypt : Mansora University, 2001.

[3] **Michielan, A.** The Danieli DANARC Plus M2 Furnace at ABS Meltshop / A. Michielan, A. Fior // Presented at 6th European Electric Steelmaking Conference, Düsseldorf, Germany, June 13–15, 1999.

[4] **Dressel, G. L.** Direct reduced iron process effects and applications / G. L. Dressel // Pawleys Island, USA. <http://www.dresseltech.com/dripart4.pdf>.

[5] **Buchebner, G.** Latest developments in magnesia-carbon bricks for modern electric arc furnaces / G.

Buchebner, A. Hanna, K.-M. Zettl // Presented at AISTech 2013, Pittsburgh, USA, May 6–9, 2013.

[6] **Rief, A.** Effects of metal powder additives on MgO–C brick performance / A. Rief, S. Heid, M. Höck // RHI Bulletin. — 2013. — № 1. — P. 33–37.

[7] **Eckstein, W.** ANKERHARTH — 50th Anniversary of electric arc furnace bottom ramming mixes / W. Eckstein, K.-M. Zettl, D. Wappel // RHI Bulletin. — 2013. — № 1. — P. 8–13. ■

Получено
© Ашраф Ханна,
Карл-Михаэль Цеттль, 2018 г.
Пер. — **О. Н. Дежнёва**
(РХИ Восток)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

UNITECR 2019

Refractories for the Future:
Collaboration among Customers, Manufactures and Academia in Pursuit of Further High-Temperature Technology

Дата **13–16 октября 2019 г.**

Место **Pacifico Yokohama**
г. Йокогама, Япония

Темы:

- Огнеупоры для производства:
 - железа и стали
 - стекла
 - цемента
- Огнеупоры для цветной металлургии
- Огнеупоры для нефтехимических процессов
- Огнеупоры для сжигания отходов
- Сырье
- Экологическая устойчивость и переработка сырья
- Достижения в области производства и оборудования
- Огнеупорные инженерные системы и дизайн
- Новые разработки
- Базовая наука
- Энергосбережение и теплоизоляция
- Тестирование огнеупоров
- Образование
- Промышленное применение огнеупоров
- Высокотемпературная инженерная керамика
- Сотрудничество между клиентами, производствами и научными организациями

Hosted by TARJ. Technical Association of Refractories, Japan

<http://unitecr2019.org/index.html>