



УДК 666.762.8:669.162.212

Альберт Дж. Джермейко (✉)

Компания Magneco/Metrel, Inc., г. Эддисон,
штат Иллинойс, США

ЗАКАТ ЭРЫ РАБОЧЕЙ УГЛЕРОДИСТОЙ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ?

Описываются технологии и материалы для монолитной футеровки наливного металлоприемника доменной печи, конструкция футеровки, а также преимущества/выгоды, получаемые от применения бетонов марки Metrapump на золь-гель связке по сравнению с традиционной углеродистой футеровкой, использование которой с ростом опыта успешной эксплуатации в наливном металлоприемнике в конечном итоге может подойти к концу.

Ключевые слова: доменная печь (ДП), металлоприемник, лещадь, рабочий слой футеровки, перефутеровка, химическая коррозия, гарнисаж, золь-гель связка, шоткретирование, углеродистая футеровка.

ВВЕДЕНИЕ

Часто стоимость капитальных затрат на перефутеровку обычной доменной печи (ДП) составляет 80–100 млн долл. США в зависимости от объема работ. Кроме того, традиционная перефутеровка требует увеличенного времени простоя ДП, обычно от 45 до 60 сут или более. Кроме того, упущенная выгода за каждые сутки простоя типовой ДП производительностью 5000 т чугуна/сут может превышать 1 млн долл. США (~40 тыс. долл. США/ч). Это означает, что упущенная выгода, недополученная при проведении традиционной перефутеровки, составит примерно от 45 до 60 млн долл. США, а общая реальная стоимость ремонта футеровки и недополученной прибыли при остановке производства, как правило, может достигнуть от 125 до 160 млн долл. США.

Столь значительные финансовые затраты побудили мировых производителей чугуна искать альтернативные решения: периодические остановки ДП на планово-предупредительный ремонт для поддержания безопасной и непрерывной работы при максимальном коэффициенте использования, минимальные затраты на простой ДП и повышение эффективности производства. Однако исторически сложилось так, что метода быстрой и надежной замены и/или обновления изношенной футеровки, альтернативного обычной перефутеровке, за счет кратковременных остановок ДП на техническое обслуживание (который увеличил бы еще и срок службы футеровки), не существует.

В 2000 г. доменному производству были предложены

уникальные огнеупорные бесцементные материалы марки Metrapump на коллоидно-кремнеземистой (золь-гель) связке. С их применением можно было проводить быструю замену/восстановление футеровки ДП как ручным пневматическим шоткретированием (на холодных печах), так и роботизированным (на горячих печах). Легко перекачиваемые бетоны марки Metrapump обеспечивали восстановление изношенной/поврежденной футеровки до первоначального профиля в процессе коротких остановок ДП на плановое обслуживание. Предложенная технология материалов и метод их нанесения позволили значительно сократить длительность простоя ДП, минимизировать время на монтаж и термообработку, продемонстрировать исключительную стойкость футеровки с продолжительным сроком службы, увеличить коэффициент использования ДП и обеспечить возможность переноса перефутеровки на более поздний срок. В настоящее время на более 320 ДП по всему миру применили эту ставшую стандартной практику быстрого восстановления футеровки заплечиков, распара и шахты в процессе кратковременных остановок ДП на техническое обслуживание вместо обычной реконструкции [1].

Начиная с 2004 г. после пяти лет успешного опыта восстановления футеровки бетонами марки Metrapump их начали применять для замены и обновления сильно изношенной футеровки фурменной зоны и



Альберт Дж. Джермейко
E-mail: AJDzermeyko@magneco-metrel.com

верха стен горна, используя метод пневматического шоткретирования или закачку/заливку «под шаблон». Когда эти материалы начнут применять для быстрого восстановления рабочего слоя футеровки металлоприемника или в качестве «искусственного гарнисажа» для изоляции новой углеродистой футеровки, было лишь вопросом времени. Это было связано с тем, что по сравнению с углеродистыми материалами продукция марки Metpump с уникальными характеристиками была идеальной для рабочего слоя футеровки, обладая почти полной невосприимчивостью к любым процессам износа, происходящим внутри металлоприемника ДП.

ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ФУТЕРОВКИ НАЛИВНОГО МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА

Примерно спустя два года после успешного применения материалов марки Metpump на зольгель связке в фурменной зоне их начали постоянно использовать для быстрого восстановления поврежденной/изношенной футеровки леток ДП. Затем после проведения шести успешных ремонтов футеровки фурменных зон на шести разных ДП по всему миру и большого количества футеровки леток огнеу-

порные бетоны марки Metpump впервые были применены для монолитного рабочего слоя футеровки горна.

Первое применение бетона марки Metpump на зольгель связке для рабочего слоя футеровки наливного металлоприемника

Впервые монолитная наливная футеровка горна была изготовлена из бетона марки Metpump в 2008 г. в новой ДП с рабочим объемом 5,500 м³ и производительностью 14 тыс. т/сут [1]. На рис. 1 показан монолитный рабочий слой футеровки первого в мире наливного горна. Затем в 2009 г. после успешной ее эксплуатации бетон марки Metpump впервые применили для восстановления изношенной футеровки из углеродистых блоков ДП среднего размера, после чего ДП продолжила работу. На рис. 2, а показана изношенная футеровка из углеродистых блоков после ее зачистки и подготовки к восстановительной заливке, на рис. 2, б — новый рабочий слой футеровки горна из бетона марки Metpump после удаления опалубки перед восстановительным ремонтом методом шоткретирования.

Затем через 2 мес после восстановления изношенной углеродистой футеровки на другой ДП малого объема с установленным «керамическим стаканом» произошел аварийный прорыв горна в зоне «слоновьей

ноги» на стыке лещади и стен горна после всего лишь двух лет эксплуатации ДП. На рис. 3, а показана футеровка стены после прорыва горна и зачистки места аварии. После консультации с доменщиками для ремонта футеровки было решено использовать бетон марки Metpump во время короткой промежуточной остановки ДП (рис. 3, б).

Спустя 1 мес в 2009 г. была введена в эксплуатацию вторая новая доменная печь с рабочим объемом 5,500 м³ и производительностью 14 тыс. т с полностью монолитной наливной футеровкой горна, аналогичная показанной на рис. 1. Таким образом, менее чем за год с начала применения технологии монолитной футеровки было восстановлено четыре наливных горна. А по состоянию на октябрь 2018 г. на более 230 ДП по всему миру была успешно применена технология наливного горна, позволившая сэкономить денежные средства и время на ремонт ДП. Предлагаемая технология применяется при изготовлении новой футеровки металлоприемников ДП, восстановлении и защите углеродистой футеровки, при выполнении огнеупорного слоя искусственного гарнисажа бетоном марки Metpump, а также при проведении промежуточного ремонта рабочего слоя изношенной углеродистой футеровки или после аварийных прорывов горна.



Рис. 1. Искусственный гарнисаж футеровки горна ДП объемом 5500 м³, выполненный из бетона марки Metpump



а



б

Рис. 2. Подготовленная к восстановлению футеровка стен горна перед заливкой бетона марки Metpump (а) и футеровка после заливки бетона перед шоткретированием фурменной зоны (б)

Дополнительные аспекты применения бетонов марки Metpump на золь-гель связке для монолитной футеровки наливного металлоприемника

Рабочий слой футеровки из бетона марки Metpump, устойчивый к расплавленным чугунам и шлаку, полностью изолирует и защищает теплопроводную углеродистую футеровку от воздействия жидких продуктов плавки в критической зоне жидкий чугун – углеродистый огнеупор. В то же время теплопроводная углеродистая футеровка эффективно охлаждает рабочий слой монолитной футеровки из бетона марки Metpump и обеспечивает формирование гарнисажа на горячей поверхности футеровки, который полностью герметизирует металлоприемник, продлевая тем самым срок его службы [2]. Однако, что наиболее важно, бетоны марки Metpump успешно применяли при кратковременных остановках ДП продолжительностью 1–3 недели для восстановления/ремонта работающей углеродистой футеровки, в которой произошел аварийный прогар горна или значительный износ, что в противном случае потребовало бы традиционной замены футеровки. Кроме того, технология выполнения футеровки бетоном марки Metpump зарекомендовала себя как надежная и больше, чем новая, продлевающая кампанию и являющаяся быстрой альтернативой традиционной перефутеровки металлоприемника [3].

Кроме того, во время ремонта/восстановления преждевременно изношенной/вышедшей из строя углеродистой футеровки стен горна было обнаружено, что часто остаточный слой углеродистой футеровки имеет сильное локальное растрескивание/перерождение, особенно вблизи аварийного прогара. А поскольку никаких предпосылок надвигающегося прорыва горна не было, о на-



Рис. 3. Поврежденная футеровка стен горна до восстановления бетоном марки Metpump (а) и футеровка горна после заливки бетоном марки Metpump с верхней частью опалубки, оставленной на задувку, и с зашоткретированным стыком стен горна и дна лещади (б)

личии материалов для замены футеровки никто и не думал. Отсутствие подходящих углеродистых материалов для ремонта футеровки потребовало в таком случае применения бетонов марки Metpump, которые по своим свойствам соответствуют высокой теплопроводности углерода, обеспечивая успешную замену поврежденных зон углеродистой футеровки новой монолитной. На рис. 4 показан пример ремонта прорыва горна сектором примерно 30°. Холодная поверхность футеровки была выполнена методом заливки теплопроводного бетона марки Metpump для восстановления участка поврежденных/разрушенных углеродистых блоков стен горна, поскольку их замена была невозможной.

После положительного опыта применения теплопроводной монолитной футеровки из бетона марки Metpump для локального ремонта поврежденных углеродистых блоков некоторые заказчики начали заменять углеродистую футеровку на полностью монолитную футеровку из бетонов марки Metpump. На рис. 5 показан типовой пример наливной монолитной комбинированной футеровки, изготовленной из двух видов бетона марки Metpump (теплопрово-

дный и рабочий слой) без углеродистых материалов.

После успешного использования монолитной комбинированной футеровки стен горна при локальном ремонте летки, когда остаточный углерод был настолько сильно перерожден из-за растрескивания, что его пришлось полностью заменить, заказчик решил выполнить на двух заново перефутерованных доменных печах безуглеродистую комбинированную футеровку стен горна по всей окруж-

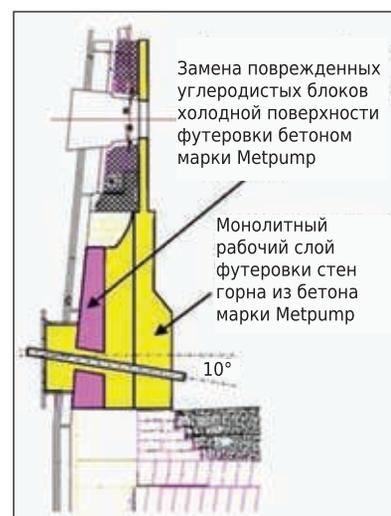


Рис. 4. Замена поврежденных углеродистых блоков холодной поверхности футеровки теплопроводным бетоном марки Metpump после прогара летки



Рис. 5. Безуглеродистая наливная комбинированная футеровка стен горна из бетонов марки Metrapump

ности (см. рис. 5). Эта футеровка была изготовлена шириной приблизительно 1 м между леткой и нижней частью фурменной зоны, а затем зашоткретирована на всю толщину материалом марки Metrapump на золь-гель связке. Такие комбинированные футеровки доказали свою эффективность и работоспособность, так как теплопроводность монолитной футеровки из бетона марки Metrapump аналогична теплопроводности типовой углеродистой футеровки.

Впоследствии в начале 2014 г. заказчик, который первым применил технологию наливного горна, изготовил комбинированную монолитную безуглеродистую футеровку металлоприемника ДП с диаметром горна 13 м, полностью состоящую из бетонов марки Metrapump взамен традиционной перефутеровки. Такая конструкция футеровки металлоприемника показана на рис. 6, а. Позже второй заказчик также изготовил аналогичную безуглеродистую комбинированную футеровку металлоприемника ДП с диаметром горна 13,4 м полностью бетонами марки Metrapump взамен традиционной перефутеровки. Конструкция футеровки показана на рис. 6, б.

Определяющие факторы выбора безуглеродистой комбинированной монолитной футеровки металлоприемника обеих ДП — минимизация затрат на простой ДП и капитальных вложений за счет исключения неизбежных при

традиционной перефутеровке дорогостоящих закупок, длительных поставок и монтажа углеродистых продуктов, а также быстрое изготовление монолитной футеровки, позволяющее продлить кампанию ДП и оптимизировать рентабельность производства.

ЧТО ТАКОЕ ОГНЕУПОРНЫЙ БЕТОН НА ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СВЯЗКЕ?

Обзор продукта

Уникальная группа огнеупорных бетонов, в которых используется запатентованная бесцементная технология коллоидно-кремнеземистой (золь-гель) связки, была разработана для проведения легкой и быстрой заливки футеровки, а также ее термообработки. Это позволи-

ло значительно сократить длительность простоя и повысить коэффициент использования металлургических агрегатов, обеспечивая при этом превосходную стойкость футеровки. Огнеупорные бетоны марки Metrapump позволяют достичь исключительной долговечности футеровки ДП, обеспечить защиту средств производства, значительную экономию энергии и расхода топлива и, как следствие, повышение производительности с дополнительной прибылью.

Компоненты продукта

Огнеупорные бетоны марки Metrapump на золь-гель связке состоят из двух-трех компонентов. Для изготовления футеровки методом заливки/закачки используют

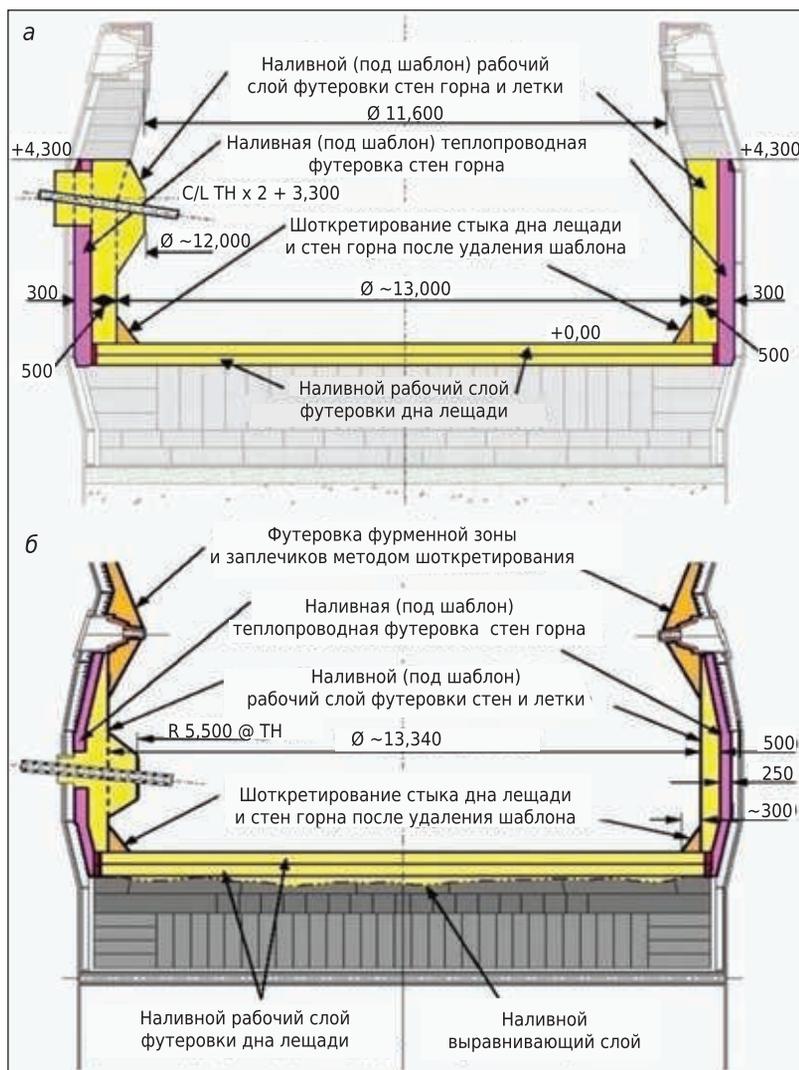


Рис. 6. Безуглеродистая наливная комбинированная футеровка из бетонов марки Metrapump на золь-гель связке: а — первый вариант; б — второй вариант

два компонента: сухой гранулированный наполнитель, не содержащий кальцево-алюминатный цемент (САС), и (вместо воды) специальный коллоидный кремнезем (золь-гель связку). Оба компонента интенсивно перемешиваются для получения легко перекачиваемого огнеупорного раствора. При нанесении этого раствора на футеровку методом пневматического шоткретирования применяется также уникальный химический катализатор, не содержащий натрия, который инжeksiруется непосредственно в поток сжатого воздуха для инициализации быстрого схватывания раствора на футеруемой поверхности. Влажный огнеупорный раствор марки Metpump на золь-гель связке обладает хорошей адгезией и очень легко прилипает ко всем поверхностям, включая огнеупоры и металлы, уменьшая потери материала при отскоке, который, как правило, в среднем составляет 3–7 % в зависимости от конкретной марки материала и состояния футеруемой поверхности.

Преимущества использования продукта

По сравнению с любыми низко- и ультранизкоцементными бетонами или огнеупорными изделиями бесцементные материалы марки Metpump на золь-гель связке обладают исключительной прочностью при высоких температурах, термостойкостью, пластичностью и устойчивостью против химического воздействия, обеспечивая при этом повышение срока службы футеровки. Прочность материалов марки Metpump на золь-гель связке при высоких температурах, как правило, в 3–4 раза выше, чем у обычных огнеупорных бетонов на цементной связке. Кроме того, бесцементные материалы, обладая высокой адгезией, прочно соединяются между собой или с другими непережженными остаточными огнеупорными материалами, предназначенными для дальнейшей эксплуатации,

даже при высокой температуре. Такая способность к высокой адгезии особенно благоприятна, поскольку бесцементные материалы не разлагаются при воздействии на них очень высоких температур в отличие от традиционных огнеупорных бетонов на цементной связке.

Преимущества продукта при термообработке

Группа огнеупорных материалов марки Metpump на золь-гель связке обеспечивает максимально быструю термообработку футеровки, составляющую часто от одной трети до половины времени, требуемого для термообработки традиционными низкоцементными бетонами. Причина заключается в том, что материалы марки Metpump не содержат химически связанной воды и поэтому вся их физическая вода удаляется/испаряется при достижении температуры футеровки 100 °С в отличие от традиционных бетонов на цементной связке, футеровку которых необходимо последовательно нагревать до 560–620 °С для удаления химически связанной воды [4]. Следовательно, материалы марки Metpump не требуют длительных последовательных периодов выдержки температуры, характерных для бетонов на цементной связке. Это устраняет растрескивание футеровки при выходе из нее пара, окисление углеродистых изделий и, соответственно, позволяет значительно сократить график задувки ДП и сроки ее ремонта, а также увеличить коэффициент использования ДП.

Преимущества быстрого изготовления футеровки

Материалы марки Metpump разработаны для быстрого изготовления футеровки методом закачки раствора без его разжижения, что может значительно сократить длительность проведения футеровочных работ и трудозатраты. Скорость заливки раствора достигает 10–20 т/ч в зависимости

от используемого оборудования. Кроме того, поскольку материалы марки Metpump на золь-гель связке не требуют разжижения при перекачивании (в отличие от всех традиционных бетонов на цементной связке), они очень стабильны по объему, устойчивы против усадки, а их огнеупорность полностью сохраняется даже при высоких температурах.

НЕДОСТАТКИ УГЛЕРОДИСТОЙ РАБОЧЕЙ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДП

Типы углеродистых материалов

Ниже будут обсуждаться вопросы, касающиеся применения углеродистых огнеупоров в качестве футеровки металлоприемника ДП и позволяющие принять разумные решения при их выборе. Единого стандарта для обозначения имеющихся в продаже марок углеродистых материалов не существует. Каждый производитель имеет свои собственные технические условия и номенклатуру доступных марок материалов с определенными свойствами или для особых целей. В табл. 1 приведена сводная информация об углеродистых огнеупорах, используемых для футеровки элементов ДП, классифицированных по типу материала [5].

Как правило, углерод, полуграфитированный углерод и иногда полуграфит применяют в металлоприемнике ДП в качестве горячей поверхности рабочей футеровки (рабочего слоя), которая вступает в прямой контакт с жидким чугуном и шлаком. Графитированные изделия с очень высокой теплопроводностью обычно применяют в качестве арматурной футеровки, которая может обеспечить расширенный охват системы охлаждения футеровки, а для рабочего слоя футеровки не применяются, так как легко растворяются под действием насыщенного жидкого чугуна.

Таблица 1. Типы углеродистых огнеупоров, состав и температура службы

Классификация материала	Температура службы, °С	Состав	Связка
Аморфный углерод	800–1400	Углерод	Карбонизация
Тип микропористого углерода	1000–1400	Углерод + другие компоненты	»
Горячепрессованный углерод	~ 1000	Углерод	»
Электрографит	2400–3000	Электрографит	Графитизация
Полуграфит	800–1400	»	Карбонизация
Горячепрессованный полуграфит	~ 1000	»	»
Полуграфитированный углерод	1600–2200	Полуграфитированный углерод	Полуграфитизация углерода

Поведение углеродистых материалов [6]

Углеродистые огнеупоры ведут себя иначе, чем традиционные, главным образом потому, что являются теплопроводными материалами, а не теплоизоляционными. Общепринятое определение огнеупора — жаропрочный керамический материал. Таким образом, с технической точки зрения углеродистые материалы, используемые в качестве футеровочных, на самом деле не являются огнеупорными, хотя и обладают отличной теплопроводностью, стабильностью объема, стойкостью против химических воздействий и термоударов, что придает им ценность для применения в качестве огнеупоров. Тем не менее углеродистые материалы должны надлежащим способом охлаждаться для обеспечения длительного срока службы в футеровке ДП.

Все системы углеродистой футеровки работают как теплопроводные системы охлаждения, в отличие от классической футеровки, которая обычно представляет собой теплоизоляционную систему. Следовательно, с любой системой углеродистой футеровки необходимо использовать достаточное/правильное охлаждение для поддержания температур, которые должны быть ниже критической температуры реакции (КТР) каждого из механизмов химического воздействия, присутствующего в ДП (окисление воздухом и паром,

щелочами, цинком и СО, растворение углерода в жидком чугуне). Однако если сама углеродистая футеровка металлоприемника имеет слишком большую толщину, то углеродистые материалы будут находиться на большом расстоянии от системы водяного охлаждения и температура горячей поверхности футеровки будет повышаться, в результате чего могут произойти необратимое повреждение, перерождение углеродистого материала и, возможно, его растворение.

Растворение жидким чугуном

Все углеродистые продукты футеровки растворяются под действием ненасыщенного жидкого чугуна независимо от того, являются ли они аморфным или полуграфитированным углеродом, полуграфитом, электрографитом или любыми другими видами специальных углеродов с разными добавками или имеют разную микропористую структуру (супер-, ультрасупер-, ультраультрасупермикропористую и т. д.). Скорость растворения тоже может быть разной у различных типов материалов, тем не менее, потери углеродистого материала будут происходить всякий раз, когда температура какого-либо участка углеродистой футеровки станет равной или превысит температуру затвердевания чугуна 1150 °С или когда «свежий» ненауглероженный жидкий чугун вступит в непосредственный контакт с углеродистой футеровкой.

Как правило, высокоглиноземистые, муллитовые и корундохромитовые огнеупоры часто используют в самом верхнем слое дна лещади в качестве защитной изнашиваемой/горячей поверхности футеровки стен горна («керамического стакана») для минимизации воздействия непосредственного контакта углерода или полуграфита с жидким чугуном. При этом создается непроницаемый изолирующий «тигель»/«термос», в котором может находиться жидкий чугун. Однако долговечность такого традиционного рабочего слоя футеровки горячей поверхности горна ограничена перерождением/разрушением углеродистой футеровки, располагающейся за ней. Поскольку углеродистая футеровка подвергается химическому воздействию из-за недостаточного охлаждения/растрескивания при воздействии тепловых и механических напряжений, вызванных неправильной компенсацией расширения углерода, это впоследствии приводит к прерыванию теплопередачи и повышению температуры футеровки с еще более усиливающимся химическим воздействием.

Перерождение/разрушение от химического воздействия

Все материалы углеродистой футеровки подвергаются химическому перерождению/разрушению под воздействием щелочей, цинка, угарного газа, окисления водой и паром всякий раз, когда температура какого-то участка углеродистой футеровки будет достигать или превышать КТР, при которой начинается каждый из этих химических процессов, зависящих от температуры. Кроме того, скорость химического воздействия будет возрастать по мере того, как температура углеродистых частиц материала поднимется выше КТР каждого из механизмов химического воздействия. Однако механизмы воздействия щелочей, цинка и

угарного газа имеют верхний предел температуры реакции (ВПТР), при котором углеродистый материал становится слишком горячим, чтобы эти химические реакции могли продолжаться. Воздействия окисления и растворения не имеют ВПТР, и химическое воздействие продолжает безгранично усиливаться по мере повышения температуры материала. В табл. 2 приведены показатели КТР и ВПТР разных механизмов химического воздействия на футеровку ДП.

И химическое воздействие, и последующее перерождение/разрушение структуры углеродистого материала будут происходить каждый раз, когда температура какого-либо участка углеродистой футеровки будет достигать или превышать КТР каждого из механизмов химического воздействия. И будет продолжаться до тех пор, пока не достигнет ВПТР или пока футеровка полностью не переродится и не растворится в жидком чугуне. Такое химическое воздействие происходит независимо от состава и структуры углеродистого материала, однако скорость химического воздействия таких температурно-зависимых реакций для разных типов углеродистых материалов может быть неодинаковой.

Следует также отметить, что постоянный, непрерывный рост толщины углеродистой футеровки стен горна по вертикали в течение кампании ДП в результате ее непрерывного объемного расширения обусловлен отложением углерода

в микроструктуре углеродистого огнеупора в результате воздействия угарного газа, щелочи и цинка. Однако химические реакции с СО, щелочами и цинком, вызывающие такой рост углеродистой футеровки, зависят от температуры. Это означает, что если бы можно было поддерживать температуру углеродистой футеровки ниже КТР каждого из этих механизмов химического воздействия, то сами реакции не могли бы происходить. Таким образом, вопрос вертикального расширения (набухания) углеродистой футеровки будет полностью решен путем проектирования и устройства футеровки стен горна, охлаждаемой надлежащим образом, с учетом дифференциального теплового роста, устранения образования трещин и преград для передачи тепла и перерождения/разрушения углерода в результате химического воздействия. Таким образом, по всей толщине футеровки следует поддерживать температуру, которая будет ниже КТР, необходимой для перерождения/разложения углерода под воздействием СО, щелочей и цинка.

Однако наиболее важный момент заключается в том, что, поскольку все механизмы химического воздействия, которые в конечном итоге разрушают углеродистые материалы, являются температурно-зависимыми реакциями, единственный способ их предотвращения — контроль температуры углеродистой футеровки, которая никогда не

должна превышать КТР любого механизма химического воздействия.

ОСОБЕННОСТИ УГЛЕРОДИСТОЙ РАБОЧЕЙ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА

Особенности углеродистого материала и конструкции футеровки

Разработчику углеродистой футеровки металлоприемника ДП важно решать реальные задачи, препятствующие достижению проектных показателей работы и стойкости футеровки, а не ошибочно устранять симптомы, возникающие при возникновении проблем. Аналогия — прием аспирина от боли (симптом) при сломанной лодыжке (проблема). Аспирин только скрывает проблему, устраняя боль (симптом), но абсолютно не помогает для устранения источника проблемы, вызывающей симптом.

Один из примеров устранения симптомов вместо решения реальной проблемы при эксплуатации металлоприемника — постоянно увеличивать толщину стен горна от кампании к кампании (и это почти стандартная практика) в ответ на серьезный износ их футеровки. Особенно это относится к так называемой зоне «слоновьей ноги» на стыке между дном лещади и стеной горна, в результате чего толщина стен металлоприемника может достигать 2 м и охладить такую футеровку практически невозможно. На самом деле анализ конструкции показывает, что

Таблица 2. КТР/ВПТР разных механизмов химического воздействия на футеровку ДП в зависимости от температуры

Компонент химического воздействия	Аморфный углерод	Горяче-прессованный углерод	Микропористый углерод	Полуграфит горячего прессования	Графит с низким содержанием железа	Стандартный графит
Щелочь (K, Na)	850/1100	1100/1150	900/1100	1100/1150	900/1100	850/1100
Цинк	860/1150	1100/1150	900/1100	1100/1150	900/1100	850/1100
Угарный газ (СО)	400/750	450/750	400/750	450/750	650/750	450/750
Пар (потеря 1 % объема за 24 ч)	400/*	400/*	400/*	400/*	500/*	450/*
Жидкий чугун	1150/*	1150/*	1150/*	1150/*	1150/*	1150/*

* Нет ВПТР.

основной причиной серьезного износа огнеупора в зоне «слоновой ноги» является сочетание факторов, связанных с проектированием и конструкцией футеровки стен горна:

- слишком большая толщина футеровки для охлаждения стены горна ниже КТР механизмов химического воздействия (Na, K, Zn, CO, окисление, шлак);

- невозможность компенсировать круговое, вертикальное и радиальное тепловое расширение углеродистой футеровки, приводящее к сильному растрескиванию и «защемлению» сколов огнеупоров, что, соответственно, нарушает их целостность и эффективную теплопередачу при проникновении расплавленного материала;

- невозможность устранения серьезных дифференциальных напряжений, возникающих внутри углеродистой футеровки, что приводит к сильному растрескиванию огнеупора, прерыванию теплообмена и, как следствие, к усиленному износу огнеупора;

- слишком высокая толщина футеровки, препятствующая охлаждению горячей поверхности стен до температуры ниже 1150 °С — температуры затвердевания жидкого чугуна, не позволяет достичь теплового равновесия и подвергает углеродистую футеровку постоянному износу и растворению жидким металлом независимо от ее микропористой структуры;

- слишком толстая футеровка, склонная к растрескиванию, неспособна изолировать границу чугун – углерод, обуславливает ее износ/перерождение и потерю «массы в зависимости от времени» до тех пор, пока не произойдет аварийный прорыв горна или преждевременное завершение кампании ДП.

Тем не менее устранение симптома этих проблем (износ футеровки) пытаются решить

еще большим увеличением толщины углеродистых стен вместо исправления фактических проблем; сами источники проблем не рассматриваются, не учитываются и не исправляются. И, как следствие, эти нерешенные проблемы будут возникать в новой, еще более толстой футеровке, еще более остро, чем это было с предыдущей неверно спроектированной футеровкой.

Дело в том, что сильно потрескавшаяся, слишком толстая и неэффективно охлаждаемая углеродистая футеровка не обеспечивает необходимую передачу тепла или вообще препятствует ей. Неспособность к охлаждению футеровки приводит к разложению углерода, которое при повышении температуры углерода только усиливается, ускоряя процесс его разложения. Это еще больше повышает температуру горячей углеродистой поверхности, часто до температуры жидкого чугуна. К сожалению, ошибочное устранение симптома вместо решения реальной проблемы только продлевает период, пока износ/потеря еще более толстой футеровки стен горна не достигнет критического состояния.

Не следует ожидать, что структура углеродистого материала преодолет недостатки слишком толстой и плохо охлаждаемой футеровки

Другой пример решения симптома проблемы углеродистой футеровки металлоприемника вместо решения самой проблемы — применение углерода с микропористой структурой в попытке компенсировать недостатки, обусловленные повышенной толщиной футеровки. Недостаточное охлаждение футеровки и отсутствие компенсации дифференциального теплового расширения будут приводить к тому, что, находясь под напряжением, микропористая углеродистая футеровка будет подвергаться многочис-

ленному растрескиванию, нарушая теплопередачу. Затем это приведет к усиленному химическому воздействию на углеродистый материал, характеристики которого, в конечном итоге ухудшатся и он будет растворен в результате проникновения ненасыщенного жидкого чугуна. А, как известно, продукты с микропористой структурой обладают высокой прочностью и высоким модулем упругости, что указывает на их хрупкую структуру, склонную к растрескиванию.

Кроме того, микропористая структура углеродистого материала не может предотвратить растворение углерода ненасыщенным жидким чугуном; она только немного замедляет этот процесс. На самом деле, до тех пор, пока любой микропористый углерод постоянно подвергается воздействию ненасыщенного жидкого чугуна, он будет растворяться. И это только лишь вопрос времени. Поэтому исходные микропористые материалы после износа заменялись супермикропористым углеродом, а затем ультрасупер-, ультраультрасупермикропористым и т. д. Но, согласно химическим законам, ненасыщенный чугун растворяет любой углеродистый материал при его температуре от 1150 °С или выше. Тем не менее растворение углерода — это тоже химическая реакция, зависящая от температуры, поэтому растворение остановится или даже никогда не начнется, если температура углеродистого материала поддерживается на уровне ниже 1150 °С.

Таким образом, проблему слишком толстой футеровки стен горна, горячая поверхность которой располагается слишком далеко от системы охлаждения, следует решать путем создания термоэффективной футеровки оптимальной толщины. Такая футеровка будет обеспечивать соответствующую компенсацию теплового расширения для минимизации напряжений и устранения рас-

трескиваний. В совокупности это позволяет достичь теплового равновесия внутри футеровки за счет образования на ее горячей поверхности гарнисажа, который полностью изолирует границу чугуна – углерод.

Формирование зоны хрупкости в слишком толстой и плохо охлаждаемой углеродистой футеровке

Как обсуждалось ранее, все механизмы химического воздействия, которые отрицательно влияют на углеродистые материалы, имеют критическую температуру реакции (КТР), при которой углерод становится достаточно горячим для начала химического воздействия. Механизмы химического воздействия щелочами, цинком и оксида углерода имеют верхний предел температуры реакции (ВПТР), при которой углеродистый материал становится просто слишком горячим для продолжения химического воздействия. Таким образом, зона углеродистых материалов, расположенная между изотермами КТР и ВПТР для каждого механизма химического воздействия на углеродистую футеровку, фактически определяет зону химического воздействия на углеродистую футеровку, в которой значительно ухудшаются ее структура и свойства, включая набухание и растрескивание, а также потерю теплопроводности.

Структура углеродистого материала в зоне между изотермами КТР и ВПТР становится мягкой, рыхлой и непрочной, благодаря чему получила название «зона хрупкости». Эта зона хрупкости, подверженная химическому воздействию, располагается внутри углеродистой футеровки стены горна и полностью скрыта от глаз. Химическое воздействие начинается внутри футеровки, в которой углерод становится уже достаточно горячим для начала реакции (изотермы КТР), и прекращается также внутри футеровки, когда

углерод достигает слишком высокой температуры (изотермы ВПТР) для поддержания химического воздействия щелочей, цинка и оксида углерода.

Углеродистые материалы могут окисляться и исчезать

В присутствии воздуха или пара все углеродистые материалы будут окисляться, и этот процесс будет значительно усиливаться при их температуре выше КТР для конкретной марки материала. В табл. 2 приведены типовые пороговые значения КТР окисления паром разных углеродистых материалов. Стандартным критерием определения этих порогов окисления является температура, при которой углеродистый материал теряет 1 % своего объема в течение 24 ч, т. е. углеродистый материал превращается в газ и полностью исчезает. Но важно понимать, что процесс потери углеродистой футеровки от окисления не имеет ВПТР. Это означает, что углеродистый огнеупор, температура которого равна или выше КТР окисления и находится в среде пара или воздуха, будет продолжать нести потери от окисления, пока весь углеродистый огнеупор не исчезнет, превратившись в газ!

Такой эффект потерь от окисления может проявляться в виде случайного дефекта или свища, который образуется внутри углеродистой футеровки и, как правило, сопровождается образованием трещин. Это позволяет потоку окислительного пара при утечке прогоревших холодильников проникнуть внутрь углеродистой футеровки. Конечно, особая опасность состоит в том, что при потере футеровки от окисления могут образовываться «туннели», которые позволяют потоку жидкого чугуна быстро проникнуть в стену горна, и если такой туннель упирается в холодильник с водяным охлаждением или металлический кожух ДП с наружным поливом, то может

произойти аварийный прорыв горна. Таким образом, единственные способы устранить потерю футеровки при окислении — поддержание температуры углеродистого огнеупора ниже уровня КТР окисления и немедленное устранение источника окисления (утечка воды или проникновение воздуха), как только он будет обнаружен.

Приблизительно 70–80 % слишком толстой и плохо охлаждаемой углеродистой футеровки обречено на потерю

Химически не поврежденная поверхность углеродистого огнеупора в любой слишком толстой и плохо охлаждаемой углеродистой футеровке, не имеющей также компенсации дифференциального теплового расширения, будет располагаться как на холодной поверхности стен горна (на которой огнеупор слишком холодный для начала химической реакции), так и на горячей поверхности (на которой огнеупор слишком горячий для продолжения химического воздействия щелочей, цинка и оксида углерода). Кроме того, горячая поверхность химически не поврежденного, но сильно растрескавшегося слоя углеродистого материала также потеряла бы связь с переродившейся зоной углерода в зоне расположения изотерм ВПТР и, таким образом, после жесткого физического воздействия на ее поверхность механическим оборудованием легко бы сдвинулась и откололась, как правило, слоями. В свою очередь, потеря футеровки под горячей поверхностью полностью обнажает мягкий и рыхлый переродившейся углерод — зону хрупкости позади него, которая затем может быть легко и полностью очищена до неповрежденного слоя углеродистого огнеупора у холодной поверхности футеровки стены.

Это означает, что углеродистые материалы, подвержен-

ные химическому воздействию до обнажения зоны хрупкости и неповрежденного растрескавшегося слоя на горячей поверхности огнеупора, который потерял связь с этой зоной, составляя, как правило, 70–80 % первоначальной толщины футеровки (которая уже потеряет свою эффективность в качестве рабочего слоя футеровки металлоприемника).

Приблизительно 20–30 % плохо охлаждаемой и слишком толстой углеродистой футеровки не подвержено химическому воздействию и может быть повторно использовано

Исходя из опыта, можно заключить, что холодная поверхность огнеупора любой плохо охлаждаемой и слишком толстой углеродистой футеровки обычно сохраняет свои характеристики потому, что она располагается настолько близко к системе охлаждения, что ее можно поддерживать при температурах ниже КТР при всех механизмах воздействия. Следовательно, эта остаточная холодная поверхность футеровки не может быть подвергнута химическому воздействию.

Однако следует отметить, что зона холодной поверхности остаточной углеродистой футеровки также потеряла бы свою связь с любой перерожденной зоной хрупкости, подвергнутой химическим атакам и находя-

щейся за ее горячей поверхностью, а расположение изотермы КТР определяет место начала химического воздействия на углеродистую футеровку. Однако если полностью удалить любую зону хрупкости переродившегося углеродистого огнеупора, то обычно остается кольцо холодной поверхности футеровки из достаточно прочного, полностью повторно используемого углеродистого материала.

Как правило, из опыта следует также, что холодная поверхность остаточной химически не поврежденной углеродистой футеровки будет составлять приблизительно 20–30 % первоначальной толщины футеровки, сохраняя характеристики практически нового материала. Именно эту прочную неповрежденную холодную поверхность остаточной углеродистой футеровки можно использовать в качестве основы для заливки бетоном марки Metpump. На рис. 7 показана заливка бетонного раствора марки Metpump слоем толщиной 250–300 мм за временную опалубку для восстановления остаточной углеродистой футеровки стен горна до практически нового состояния рабочего слоя футеровки. Для такой заливки кольца футеровки стены горна по всей окружности требуется всего 10 ч.

ПРЕИМУЩЕСТВА БЕТОНОВ МАРКИ МЕТРИМП НА ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СВЯЗКЕ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО СЛОЯ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА

По сравнению с углеродистыми огнеупорами материалы марки Metpump являются идеальными в качестве рабочего слоя футеровки

Бесцементные бетоны на золь-гель связке отлично зарекомендовали себя при теплоизоляции металлоприемника и границы раздела жидкий чугун – углерод, а в сочетании с

эффективно охлаждаемой высокотеплопроводной зачищенной остаточной углеродистой футеровкой с низким тепловым сопротивлением могут оптимизировать ее эксплуатацию намного лучше, чем восстановленная футеровка горна во время короткой остановки ДП на ремонт для продления кампании.

Прочное соединение бетонов на золь-гель связке с остаточной углеродистой футеровкой, обеспечивающее ее бесперебойное охлаждение

Бесцементные бетоны на золь-гель связке обладают сильной адгезией и прочно сцепляются между собой или с другими зачищенными и неперерожденными огнеупорными материалами, на которые они наносятся. Эта способность к «склеиванию» особенно важна при их использовании в качестве материала для ремонта или восстановления толщины футеровки. А поскольку материалы на золь-гель связке не содержат цемента, они не разрушаются после воздействия очень высоких температур в отличие от традиционных огнеупорных бетонов на цементной основе. Кроме того, отсутствие в растворе химически связанной воды и очень быстрая сушка в сочетании с сильной адгезией делают эти материалы особенно ценными для быстрого ремонта футеровки или восстановления ее толщины даже в условиях очень высоких температур технологического процесса.

Дополнительно было разработано специальное неорганическое химическое поверхностно-активное вещество, которое распыляется на зачищенные остаточные углеродистые огнеупоры перед нанесением материалов на золь-гель связке. Это вещество в 2–3 раза увеличивает прочность связующей системы золь-гель связки с углеродистыми огнеупорами даже с электрографит-



Рис. 7. Заливка бетонного раствора марки Metpump за временную опалубку для восстановления зачищенной прочной остаточной углеродистой футеровки (наливная футеровка)

том. Такая способность к «склеиванию» оказывается особенно полезной, поскольку позволяет создавать наливную или шоткрет-футеровку из бетонов на золь-гель при изготовлении рабочего слоя футеровки металлорециркулятора, обеспечивая непрерывную передачу тепла от горячей поверхности наливной футеровки на золь-гель связке к теплопроводной углеродистой футеровке без разделительных зазоров, которые могли бы препятствовать процессу охлаждения. А поскольку материалы на золь-гель связке не содержат цемента, они не разлагаются при воздействии очень высоких температур, сохраняя, таким образом, эффективность передачи тепла при длительной кампании печи.

На рис. 8 показаны образцы графитированного блока, на который подливали раствор на золь-гель связке. Затем образец был обожжен для придания ему прочности и подвергся испытанию на изгиб в попытке разрушить соединение между графитом и наливным материалом. Однако, как видно на рис. 8, образец разрушился через границу соединения, а не по ней.

Специально разработанные бетоны на золь-гель связке для прямого контакта с жидким чугуном и шлаком без растворения в отличие от всех видов углеродистых материалов

Бетоны на золь-гель связке были специально разработаны



Рис. 8. Прочное соединение бесцементного бетона на золь-гель связке с графитом

для службы в условиях прямого контакта с жидким чугуном и шлаком вплоть до температуры, которая может достигать примерно 1700 °С. Бетоны имеют долгую историю непревзойденного успеха в самых разных сферах применения для разделения чугуна и шлака, а также для футеровки ковшей. Огнеупорный бетон на золь-гель связке чрезвычайно устойчив к эрозионному воздействию жидкого чугуна и шлака, что видно из сравнительного теста (рис. 9), когда он превзошел по стойкости типовое обожженное формованное огнеупорное изделие, используемое обычно для футеровки зоны «керамического стакана» в европейских ДП.

Огнеупорные бетоны на золь-гель связке также чрезвычайно устойчивы к термоударам, химическим воздействиям и абразивному износу в отличие от традиционных огнеупоров. А так как допустимый предел рабочей температуры бетонов на золь-гель связке примерно 1700 °С (что выше максимальной температуры технологического процесса в горне ДП), то монолитная футеровка не будет плавиться или иным образом растворяться в жидких продуктах плавки в отличие от всех неохлаждаемых/

плохо охлаждаемых углеродистых материалов. Таким образом, основная причина уменьшения толщины монолитной футеровки из бетонов на золь-гель связке будет заключаться в медленной и длительной эрозии, вызываемой потоком жидкого чугуна, а не внезапным растрескиванием, термоударом или потерей огнеупора при его перерождении, как это происходит у типовых огнеупоров или бетонов.

Как показано ранее, предпочтительная конструкция футеровки ДП — теплопроводная углеродистая футеровка, служащая в качестве холодной поверхности для эффективного охлаждения монолитного рабочего слоя, выполненного из бетона на золь-гель связке, для поддержания температуры футеровки ниже температуры затвердевания чугуна 1150 °С. Следовательно, вместо прямого воздействия потока жидкого чугуна и шлака на футеровку ДП на ее горячей поверхности формируется относительно тонкий слой гарнисажа, создающий тепловое равновесие и полностью защищающий рабочий слой футеровки от любых вредных технологических воздействий, сводя к минимуму эрозионный эффект.

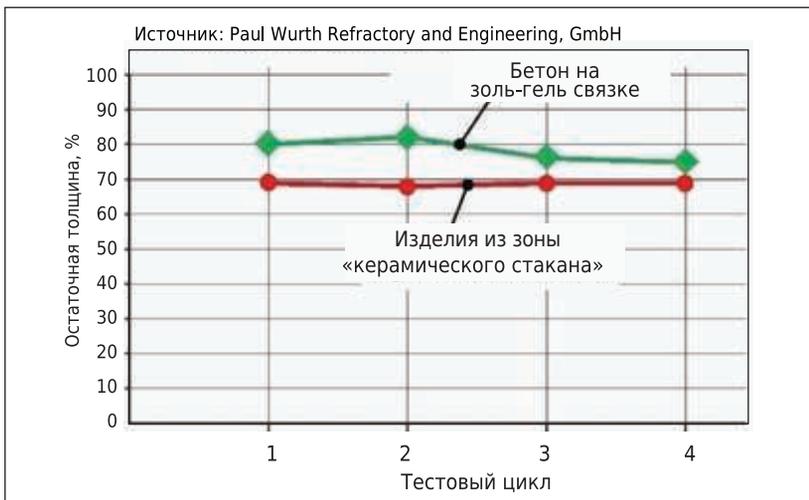


Рис. 9. Сравнительная стойкость к жидкому чугуну и шлаку бетона на золь-гель связке и обожженных изделий из зоны «керамического стакана». Тестовые параметры вращающейся печи: жидкий чугун, шлак и кокс, температура 1500 °С, 1 цикл/ч, всего 4 цикла

Бетонам на золь-гель связке не требуется охлаждение для сохранения работоспособности в отличие от углеродистых материалов

Во многих случаях огнеупорные бетоны на золь-гель связке подвергаются постоянному воздействию жидких материалов: и при разделении чугуна и шлака в желобах ДП, и при футеровке ковшей, которая обычно не охлаждается снаружи, за исключением, возможно, естественной конвекции через металлический кожух. Следовательно, огнеупорным бетонам не требуется охлаждения для устойчивости против воздействий жидкого чугуна и шлака вплоть до предельной температуры их службы около 1700 °С. Поэтому материалы на золь-гель связке не подвергаются расслаиванию, растрескиванию и разрушению под воздействием высоких рабочих температур в отличие от обычных огнеупоров и низкоцементных бетонов.

Бетоны на золь-гель связке более устойчивы к химическим воздействиям, чем углеродистые материалы

Огнеупорные бетоны на золь-гель связке специально разра-

ботаны для службы в ДП и содержат специальные добавки, придающие бетонам исключительную стойкость против химического воздействия жидкого чугуна и шлака, а также щелочей и цинка. Кроме того, бетоны не подвержены воздействию СО и, следовательно, не будут расширяться и растрескиваться, как это происходит со всеми углеродистыми материалами в результате реакции Будуара.

Одна из характерных особенностей бетонов, обеспечивающая их уникальную стойкость к химическому воздействию, заключается в том, что, поскольку материалы на золь-гель связке не содержат химически связанной воды, их пористость остается относительно постоянной по мере достижения рабочих температур в отличие от бетонов на цементной связке.

На рис. 10 показаны результаты испытаний двух марок бетона на золь-гель связке, показывающие превосходную стойкость к воздействию щелочей, на рис. 11 — результаты испытаний к воздействию СО, которые не показали перерождения и ухудшения свойств.

Эксплуатационные качества бетонов на золь-гель связке

при выполнении рабочего слоя футеровки металлоприемника в сравнении с углеродистыми материалами

Успешный опыт применения наливного металлоприемника при восстановлении рабочего слоя изношенной и перерожденной углеродистой футеровки с использованием бетонов на золь-гель связке объясняется не только преимуществами их характеристик, но и достаточно высокой теплопроводностью футеровки.

Зачищенная остаточная футеровка химически не тронутого углеродистого материала холодной поверхности будет составлять примерно 20–30 % первоначальной толщины всей футеровки, обладая характеристиками практически новой футеровки. Именно эта прочная, неповрежденная, с высокой

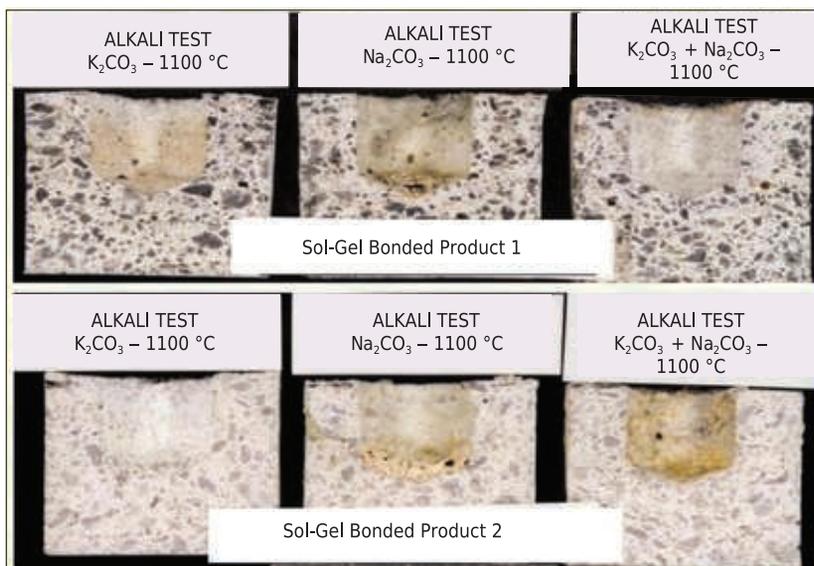


Рис. 10. Тест на стойкость двух марок бетона на золь-гель связке к воздействию щелочей при выдержке в тигле при 1100 °С в течение 5 ч

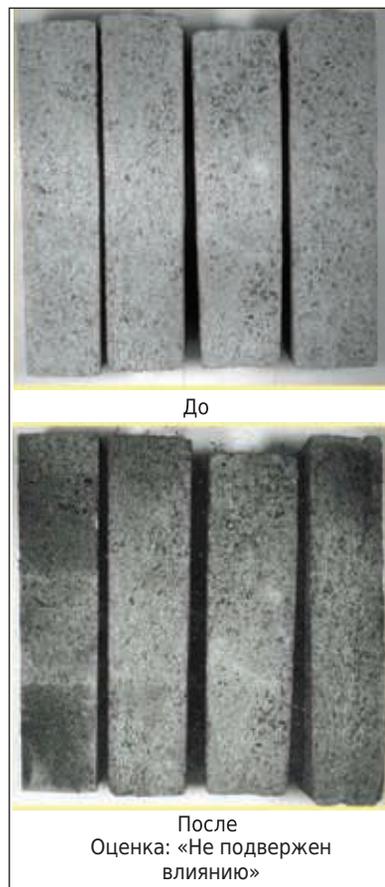


Рис. 11. Образцы бетона на золь-гель связке после воздействия СО при 500 °С в течение 100 ч

теплопроводностью холодная поверхность остаточной углеродистой футеровки, которую можно использовать повторно, и является идеальной основой для восстановления футеровки наливного горна бетонами на золь-гель связке наращиванием искусственного гарнисажа, как показано на рис. 12.

На рис. 13 показано сравнение перерожденной углеродистой футеровки с низкой теплопроводностью (высоким сопротивлением к передаче тепла λ_1) и остаточной углеродистой футеровкой холодной поверхности с высокой теплопроводностью (низким сопротивлением к передаче тепла λ_2), на которую нанесен восстановительный слой бетона на золь-гель связке толщиной 250–300 мм. Поскольку теплопроводная и неповрежденная остаточная углеродистая футеровка может эффективно охлаждать относительно тонкий слой огнеупорного бетона на золь-гель связке, то на его горячей поверхности образуется защитный гарнисаж, полностью герметизирующий стену горна и изолирующий / защищающий ее от любых вредных процессов доменного производства.

Примеры конструкций монолитного рабочего слоя футеровки металлоприемника из бетонов на золь-гель связке

На рис. 14, 15 показано восстановление остаточной углеродистой футеровки, на рис. 16 — изготовление новой рабочей футеровки стен горна и дна лещади; в обоих случаях применяли бетон на золь-гель связке во время останова ДП в течение 2–3 недель. Успех этой технологии меняет тра-

диционный подход к планированию ремонта ДП. Быстрый ремонт или замена изношенной футеровки методом заливки или шоткретирования в сочетании с общепринятой практикой восстановления изношенной футеровки фурменной зоны, заплечиков, распара и шахты бетонами на золь-гель связке в настоящее время являются альтернативой продолжительной останова ДП при традиционной перефутеровке.

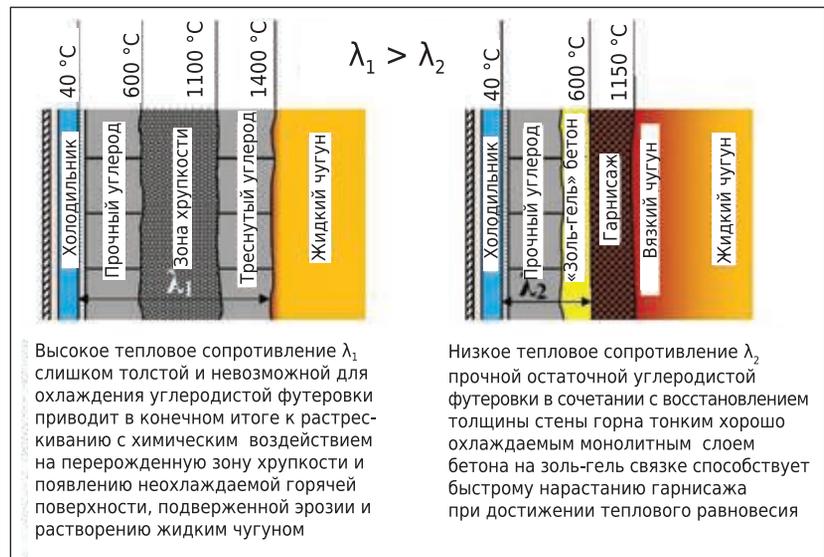


Рис. 13. Сравнение теплопроводности изношенной и остаточной прочной углеродистой футеровки с наливным слоем из перекачиваемого огнеупора на золь-гель связке с гарнисажем

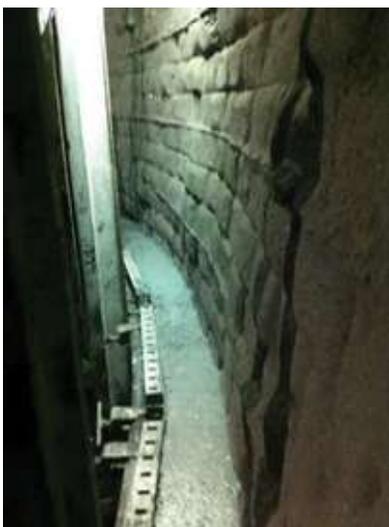


Рис. 12. Закачка раствора на золь-гель связке между опалубкой и остаточной углеродистой футеровкой хорошего качества для восстановления изношенной футеровки стен горна

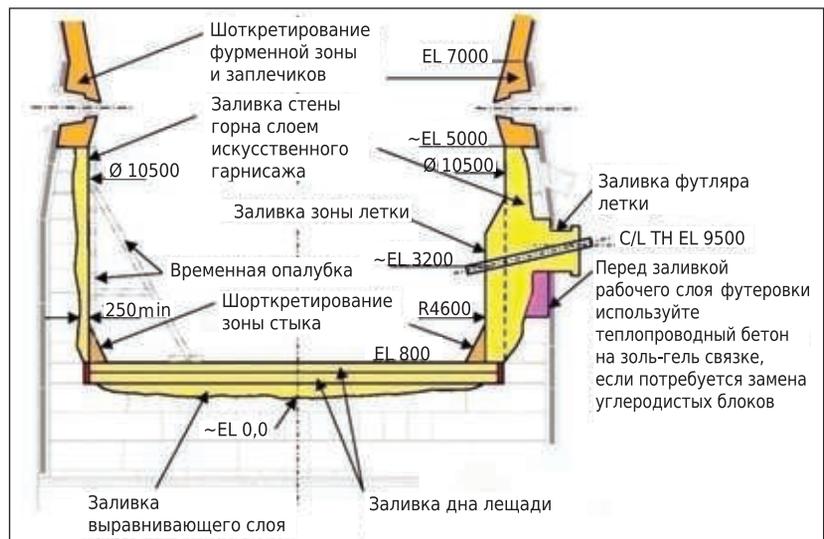


Рис. 14. Восстановление футеровки стен горна, летки и дна лещади бетонами на золь-гель связке при промежуточном ремонте взамен традиционной перефутеровки углеродистыми материалами

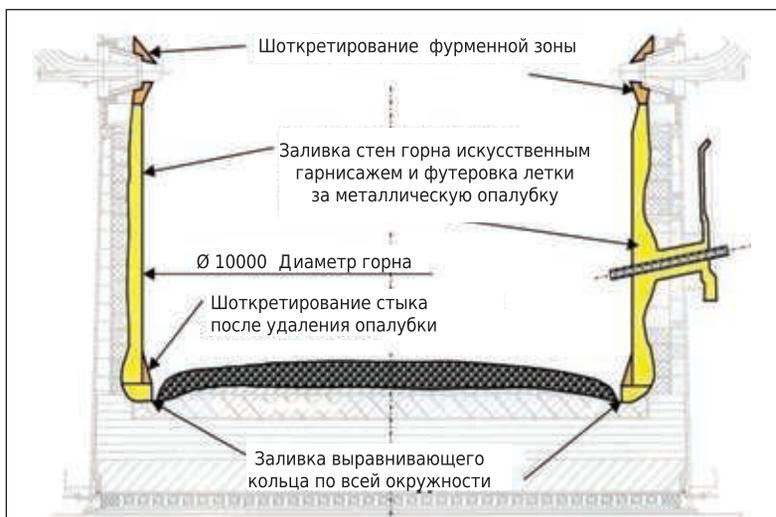


Рис. 15. Восстановление рабочего слоя футеровки стен горна и летки без ремонта дна лещади

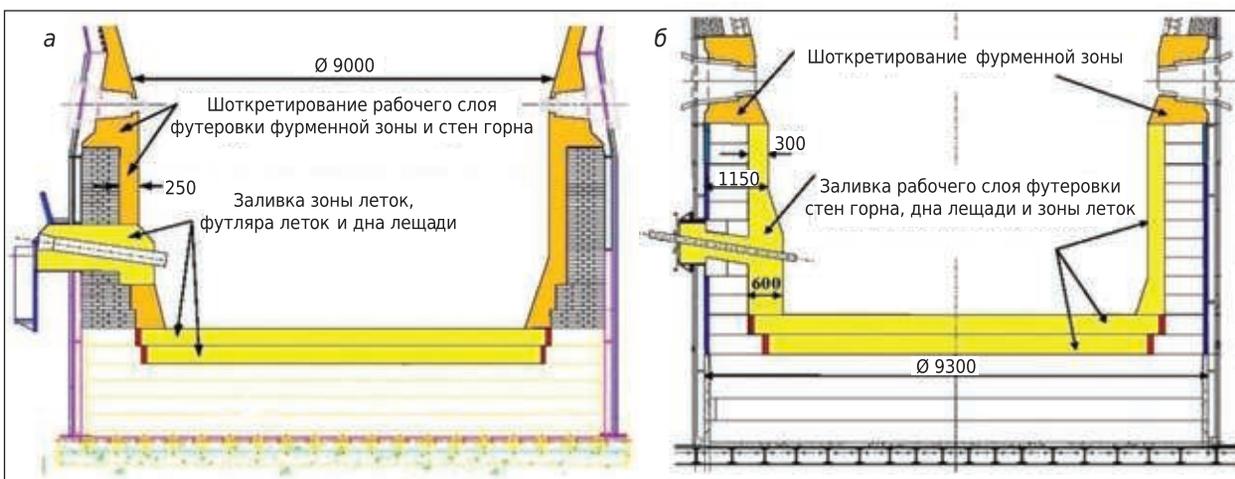


Рис. 16. Монолитная футеровка лещади, горна, летки и фурменной зоны, выполненная бетонами на золь-гель связке при быстром ремонте ДП (а) и новой ДП (б)

ВЫВОДЫ — МОНОЛИТНАЯ РАБОЧАЯ ФУТЕРОВКА ИЗ БЕТОНОВ НА ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СВЯЗКЕ ПРЕВОСХОДИТ УГЛЕРОДИСТУЮ ФУТЕРОВКУ

Практика проведения периодического непродолжительного ремонта по восстановлению изношенной футеровки металлоприемника ДП бетонами на золь-гель связке в настоящее время уже признана подтвержденной и является эффективной технологией. Быстрое восстановление футеровки металлоприемника до первоначального размера с использованием бетонов на золь-гель связке позволяет отложить капитальный ремонт или перифутеровку ДП, поддержи-

вать ее работу в непрерывном и безопасном режиме, повысить коэффициент использования ДП и, что более важно, оптимизировать производительность и эффективность ее эксплуатации. В дополнение к продлению срока службы повышается безопасность работы доменщиков и обеспечивается защита/сохранение ценных активов/средств производства заказчика.

На основании полученного опыта и анализа показателей производительности ДП и долговечности восстановленной и новой углеродистой футеровки с использованием бетонов на золь-гель связке многие доменщики начали успешно при-

менять полностью монолитную футеровку из бетонов на золь-гель связке без углеродистых материалов (см. рис. 6).

На сегодняшний день более 230 ДП по всему миру имеют частичный или полностью монолитный рабочий слой футеровки металлоприемников из бетонов на золь-гель связке, что доказывает их значимость в качестве реальной альтернативы традиционной футеровке из углеродистых материалов. Бетоны на золь-гель связке обладают существенными преимуществами для футеровки металлоприемника по сравнению с углеродистыми материалами, это:

- улучшенные эксплуатационные показатели:
- отсутствие потерь при растворении жидким чугуном в отличие от всех углеродистых материалов, безопасное пребывание в прямом контакте с жидким чугуном;
- отсутствие потерь от окисления газами и появления свищей;
- стойкость к воздействию угарного газа (CO), отсутствие объемного расширения (набухания) и растрескивания в отличие от углеродистых материалов;
- не требуют охлаждения для поддержания своих характеристик, рекомендуемая температура службы 1700 °С;

- устойчивость к эрозии жидким чугуном и шлаком;
 - значительная экономия затрат и эксплуатационных расходов;
- низкие капитальные затраты на закупку материалов;
- быстрая поставка материалов;
- низкие капитальные затраты на конструкцию футеровки, оптимизированная, обеспечивающая эффективную теплопроводность конструкция футеровки;
- быстрая укладка раствора — обычная скорость заливки 10–20 т/ч;
- сокращенное время монтажа футеровки и экономия трудозатрат;
- меньшее время простоя печи, монтаж может быть выполнен во время остановки ДП на 1–3 недели;
- меньшие потери недополученной продукции (производства чугуна); стоимость недополученного из-за более длительного простоя ДП чугуна может возместить затраты на всю монолитную футеровку горна.

Очевидные преимущества монолитной футеровки из бетонов на золь-гель связке по сравнению с углеродистой футеровкой в сочетании с оптимальной конструкцией футеровки, а также выгода и экономия, полученные при ее применении, могут в конечном итоге предопределить окончание срока службы футеровки из углеродистых материалов. Это связано с тем, что теплопроводные углеродистые материалы намного больше подходят для эффективного охлаждения тонкого многослойного наливного рабочего слоя футеровки дна лещади из бетонов на золь-гель связке для того, чтобы изотерму затвердевания чугуна 1150 °С можно было «расположить» внутри бетонного слоя. Кроме того, углеродистые материалы намного больше подходят для эффективного охлаждения тонкой



Рис. 17. Монолитный рабочий слой футеровки металлоприемника, охлаждаемый теплопроводной углеродистой футеровкой

монолитной рабочей футеровки стен горна из бетонов на золь-гель связке ниже температуры затвердевания чугуна в 1150 °С, формируя слой гарнисажа, который будет защищать всю футеровку горна при достижении теплового равновесия, обеспе-

чивая максимальную производительность и продолжительную кампанию ДП. Желаемая конструкция монолитного рабочего слоя футеровки металлоприемника в комбинации с теплопроводной углеродистой футеровкой показана на рис. 17.

Библиографический список

1. **Джермейко, Альберт Дж.** Применение бетонов на золь-гелевой связке при кратковременной остановке ДП для восстановления огнеупорной футеровки вместо традиционной перефутеровки: материалы конференции и выставки технологии производства чугуна и стали, AISTech 2014, май 2014.
2. **Джермейко, Альберт Дж.** Вопросы взаимодействия чугун – углерод в горне доменной печи : конференция металлургов AISTech 2006, Кливленд, Огайо, США, 2006.
3. **Жан, Чжэнь-Вэй.** Инновационный метод ремонта поврежденного горна доменной печи, успешно примененный на заводе Stainless Business Unit компании Baosteel : конференция металлургов AISTech 2011, Индианаполис, Индиана, США, 2011.
4. **Андерсон, М. У.** Достижения в области бесцементных монолитных огнеупоров на коллоидно-кремнеземистой связке для их применения при производстве алюминия и магния : конференция Унитекр 2013, Виктория, Британская Колумбия, Канада, 2013.
5. **Джермейко, Альберт Дж.** Углеродистые огнеупоры. Часть 8. Справочник по огнеупорам ; под ред. Чарльза А. Шахта.
6. **Джермейко, Альберт Дж.** Урегулирование вопросов взаимодействия чугун – углерод в горне доменной печи : конференция металлургов AISTech 2013, Питтсбург, Пенсильвания, США, 2013.
7. **Джермейко, Альберт Дж.** Огнеупоры для производства чугуна — соображения по созданию успешных огнеупорных систем. Доменное производство : двухгодичный курс лекций, университет МакМастера, 1994, 1996, 1998, 1999, 2000. ■

Получено 02.04.21
 © Альберт Дж. Джермейко, 2021 г.
 Пер. — Э. В. Гончаров
 (компания Magneco/Metrel), 2021 г.