

Министерство образования и науки Украины
Приазовский государственный технический университет
Министерство промышленной политики Украины
Академия наук высшей школы Украины



**МАТЕРИАЛЫ
VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ТЕПЛО – И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**

Посвящается 80-летию Приазовского государственного технического университета

7-9 сентября 2010 г.
г. Мариуполь

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ ЗАВОДА «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛИ» (ШЛАКОВЫЙ И ПОД-ШЛАКОВЫЙ ПОЯС)

Смирнов А.Н., Салмаш И.Н., Ошовская Е.В. (ДонНТУ, Украина)

Особенности совокупного протекания гидродинамических и тепломассообменных процессов в агрегатах типа ковш-печь при осуществлении технологических операций перемешивания, легирования, рафинирования и модифицирования металла и т.п.

Современный агрегат ковш-печь имеет устоявшуюся архитектуру и конструкцию, в состав которого входят: система для нагрева металла электрической дугой, система подачи ферросплавов и материалов для рафинирования стали в ковше, средства для перемешивания металла инертным газом и т.п. Функционально все операции по доводке и рафинированию стали выполняются при этом в сталеразливочном ковше, что, безусловно, накладывает дополнительные требования к его футеровке. На практике длительность обработки в агрегате «ковш-печь» может составлять от 25-30 минут до 2-4 часов и более (при специальных условиях обработки). При этом в процессе обработки подогрев стали в ковше может составлять 50-120°C в зависимости от конкретных технологических требований. Подвод тепла в металл осуществляется путем электродугового подогрева шлака. Следовательно, в период подогрева металла максимальную тепловую нагрузку имеет верхняя часть ковша (зона шлакового пояса). Для футеровки зоны шлакового пояса наибольшее распространение получили высококачественные периклазоуглеродистые штучные изделия с содержанием $MgO \geq 97\%$, имеющие в своем составе комбинированные антиоксиданты и синтетические связки [1].

Основными причинами вывода шлакового пояса из эксплуатации являются износ рабочего слоя футеровки, а также ее растрескивание. Скорость износа рабочего слоя футеровки шлакового пояса колеблется в пределах 1,2-2,5 мм/ч и более в зависимости от конструкции ковша и условий обработки. Уменьшение толщины рабочего слоя шлакового пояса обычно связывают с двумя основными факторами: механическим разрушением (скалыванием) части огнеупора вследствие действия внутренних термомеханических напряжений, вызванных неравномерным прогревом различных участков футеровки, а также вследствие химической эрозии, вызванной химическим взаимодействием материала огнеупорных изделий с отдельными компонентами, входящими в состав шлака, расположенного на зеркале металла. Как правило, эти два фактора действуют совместно. При этом дополнительным технологическим параметром является нарушение нормальных условий эксплуатации футеровки, например, ее переохлаждения между наливками. Учитывая тот

факт, что при сливе стали из ковша (этот период может составлять 40-60 минут и более) шлаковый пояс оголяется первым, то его охлаждение происходит в максимально длительный период времени и имеет наибольшую величину по сравнению с другими элементами футеровки.

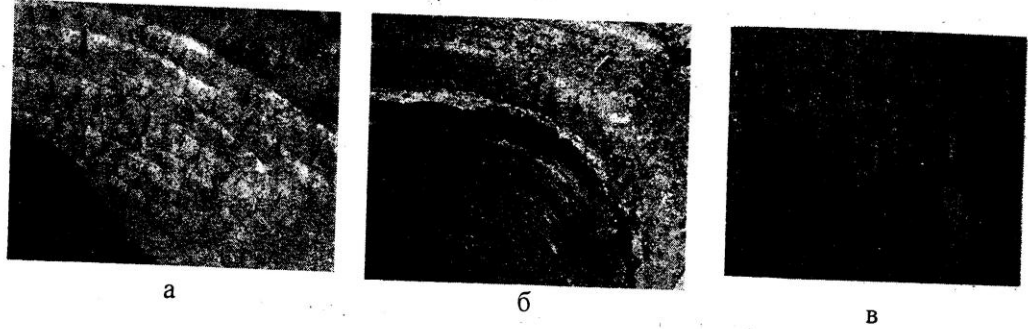


Рис.1. Внешний вид шлакового пояса 120-т сталеразливочного ковша при механическом скалывании штучных изделий (а) после 32 циклов обработки на агрегате ковш-печь и при химической эрозии (б) с затеканием стали в ложбину, в – вертикальная трещина в футеровке стены сталеразливочного ковша

На рис.1а представлена фотография состояния шлакового пояса сталеразливочного ковша после достаточно большого количества наливов, в котором разрушение произошло вследствие механических скалываний кирпичей и одновременной химической эрозии. Следует обратить внимание на тот факт, что разрушение футеровки произошло преимущественно по швам между штучными изделиями. На рис.1б представлена фотография износа шлакового пояса вследствие химической эрозии, характерной особенностью которого является появление по периметру футеровки ковша характерного углубления в месте контакта со шлаком. Как видно, разрушение от химической эрозии носит совершенно другой характер и объясняется повышенной химической агрессивностью шлака (его низкой основностью), что следует рассматривать как технологический сбой.

Для футеровки стен и днища используются преимущественно периклазоуглеродистые штучные изделия с несколько меньшим содержанием MgO. Как правило, основной причиной вывода футеровки стен ковша из эксплуатации является ее утончение и растрескивание. В процессе эксплуатации футеровки в ней формируются вертикальные трещины, которые проходят через стыки между кирпичами (рис.1в). Причиной возникновения таких трещин являются, прежде всего, сжимающие напряжения, которые возникают на горячей поверхности огнеупоров в тот момент, когда она имеет относительно низкую температуру [2, 3]. Например, перед очередным заполнением ковша сталью после разливки и технического обслуживания температура внутренней поверхности футеровки может составлять

е) 800-1000°C и ниже. Поскольку температура стали на выпуске может достигать температуры 1550-1590°C, то это может оказаться достаточным для эффекта термоудара при заполнении. Повышенный износ локальных зон футеровки следует связывать также с разрушением в процессе продувки газом вследствие контакта футеровки с потоками стали и шлака.

Таким образом, чередующиеся циклические нагрузки, связанные с охлаждением футеровки и последующим нагревом при выпуске стали в ковш и при нагреве в агрегате «ковш-печь», а также различие значений термического расширения периклазоуглеродистых изделий различного качества способствуют возникновению в футеровке значительных термических напряжений. В процессе эксплуатации ковша с каждой последующей плавкой прочностные характеристики его футеровки снижаются, и при превышении термических напряжений прочностных свойств огнеупоров происходит их разрушение, что приводит к образованию сколов и трещин.

Для качественного и количественного исследования описанных процессов в пакете ANSYS было выполнено математическое моделирование термонапряженного состояния футеровки сталеразливочных ковшей вместимостью 120 и 75 т. Механические характеристики (плотность, модель упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент линейного расширения) огнеупорных материалов приняты в соответствии с их паспортами, а стального кожуха – по справочным данным. Ограничения на перемещение приложены в местах крепления цапф ковшей. В качестве термической нагрузки принято температурное поле, полученное для условий стационарного теплообмена при постоянной температуре на внутренней стенке футеровки 1600 °C и свободной конвекции на поверхности кожуха. В результате расчета получены картины деформации и напряжений (рис.2) в футеровке ковшей.

Установлено, что под действием термической нагрузки происходит расширение стенок футеровки в радиальном направлении: для ковша 120 т на 16 мм, для ковша 75 т на 15 мм; а днище деформируется – центральная часть перемещается вверх (на 8 и 5,5 мм соответственно), а периферийная – вниз (на 7,5 и 7 мм), т.е. происходит так называемое «кобление» днища. Величина суммарных деформаций для обоих ковшей практически одинакова, хотя картины деформаций имеют некоторые отличия, особенно в придонной части и зоне днища, что связано с конструктивным отличием футеровки ковшей в этих местах. Наибольшей деформации подвержены участки шлакового пояса и подшлаковой зоны. В этой зоне происходит расширение и одновременный сдвиг соседних слоев кладки. Причем в зоне шлакового пояса деформация затрагивает практически всю толщину кладки, а для слоев футеровки стенок деформация почти в 2 раза ниже.

иять

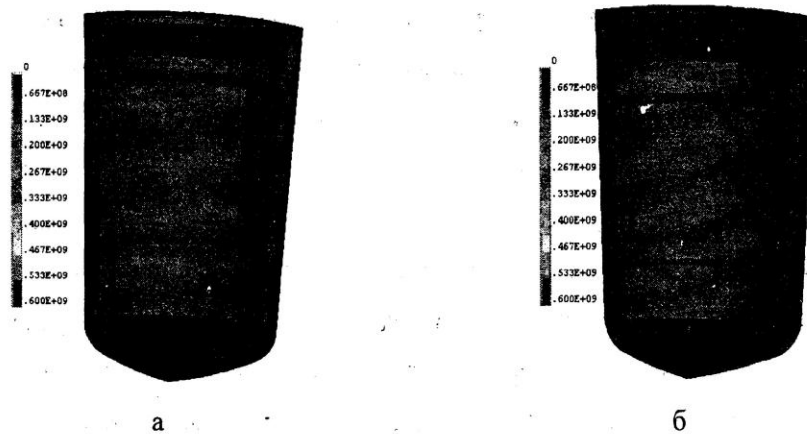


Рис.2. Эквивалентные напряжения в футеровке ковша 120 т (а) и 75 т (б) при температуре внутренней стенки 1600 °С

Напряжения, вызванные такими деформациями, превышают допустимые, что свидетельствует о возможности возникновения и развития трещин и растрескиваний в футеровке. Так, в первом слое футеровки шлакового пояса возникают напряжения 70..150 МПа (для ковша 120 т) и 100..200 МПа (для ковша 75 т). В первом слое футеровки подшлакового пояса напряжения еще выше (до 250 МПа), но занимают 1/3..1/2 толщины первого слоя. В зоне дна у ковша 120 т напряжения ниже (не более 100 МПа), а у ковша 75 т уровень напряжений в придонной зоне и днище сопоставим с зоной шлакового пояса. Концентраторы напряжений наблюдаются в местах выступов футеровки и переходов от стен к днищу. Напряжения в арматурном слое футеровки в 2–3 раза ниже, чем в рабочем слое, и не превышают допустимых значений, но в местах контакта с соседними слоями также отмечаются концентраторы напряжений, что вероятно будет способствовать разрушению этих мест кладки.

Таким образом, в режиме выдержки стали (при постоянной температуре внутренней стенки футеровки) в рабочем слое футеровки шлакового пояса и стен ковшей будут возникать напряжения и деформации, вызывающие ее разрушение.

Аналогичным образом было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния футеровки ковшей при действии теплового потока с плотностью 5500 Вт/м², соответствующего установившемуся режиму продувки стали газом с расходом 250 л/мин. Полученные картины распределения суммарных напряжений показали, что характер распределения напряжений подобен рассмотренному ранее, но при этом значения напряжений несколько ниже. Тем не менее рабочий слой стен и шлакового пояса также подвержен напряжениям, превышающим допустимые и вызывающим его разрушение. Как и ранее, концентраторы, являющиеся местами зарождения трещин, возникают в местах выступов кладки. Суммарные деформации футеровки составляют 15 и 13 мм для ковша

120
МПа
КОЛЬ
НОМ
ВЫВ
СТАЛ
РЫ С
НО М

ХОДУ
ИЗМ
120
ГО С
РАТУ
ЧАСТ
100'
ВЕН
НЫ
(СЕТ
ГИЧ
НА
СТАЛ
ИЗН

120 т и 75 т соответственно. Напряжения, возникающие в кожухе, составляют 300..500 МПа (большие значения соответствуют области днища и местам крепления опорного кольца и цапф), что близко к пределу выносливости материала кожуха, и при многократном нагружении может привести к потере прочности кожуха. В результате можно сделать вывод, что и при продувке, термонапряженность футеровки ковшей значительна.

Таким образом, для повышения стойкости и прочности футеровки рассмотренных сталеразливочных ковшей можно рекомендовать использовать для их футеровки огнеупоры с более высокими параметрами теплопроводности и механической прочности, но меньшими значениями температурного расширения.

Как было отмечено выше, в процессе эксплуатации сталеразливочных ковшей происходит неравномерный износ огнеупорного слоя, что оказывает определенное влияние на изменение температурных полей и полей напряжений, поэтому для ковша вместимостью 120 т было промоделировано термонапряженное состояние при 30% и 60% износе рабочего слоя футеровки.

Установлено, что значения температур в области зон износа изменяются. Так, температура рабочего слоя футеровки шлакового пояса и подшлакового слоя (оставшегося после частичного разрушения) возрастает на 35°C при потере толщины футеровки на 30% и на 100°C при потере толщины футеровки на 60%; температура арматурных слоев соответственно увеличивается на 20 и 70°C, а температура кожуха – на 30 и 50°C. На рис.3 приведены графики изменения температуры в футеровке шлакового пояса и подшлакового слоя (сечения №5 и №6). Значения температур в футеровке зоны днища и стен остаются практически без изменения, только на кожухе отмечается повышение на 5...10 °С. При износе на 30% повышенные напряжения отмечаются и в подшлаковом слое, и в верхней части стенки ковша, а при износе на 60% высокая напряженность отмечается не только в зоне износа, но и во всех слоях футеровки.

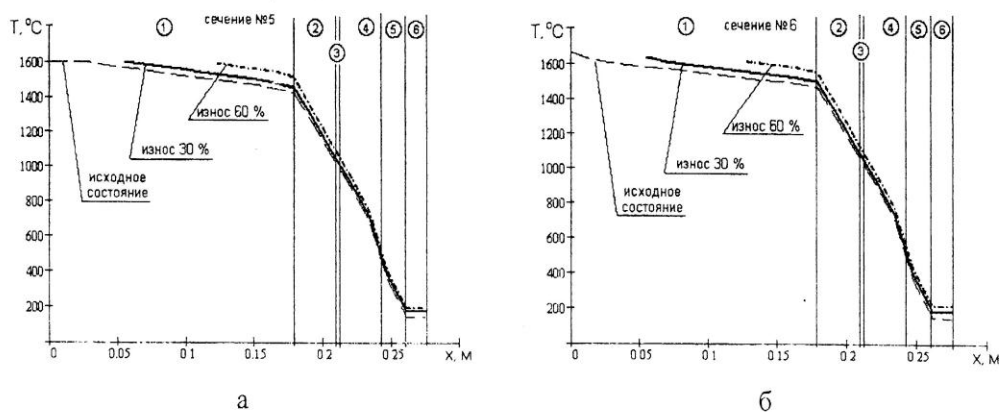


Рис.3. Графики изменения температуры в футеровке шлакового пояса (б) и подшлакового слоя (а)

Следовательно, на основании выполненных расчетов можно сделать вывод о том, что при изнашивании (локальном разрушении) рабочего слоя футеровки в большей или меньшей степени будет происходить разрушение футеровки практически по всей толщине. Напряжения стального кожуха также увеличиваются, причем зона высоких напряжений распространяется от середины до верха ковша. Это свидетельствует о том, что допускать износ футеровки на уровне 60% крайне опасно, поскольку это может привести к аварийной ситуации – прогару футеровки в зоне повышенного износа.

Библиографический список

1. Аксельрод Л.М. Опыт применения огнеупорных материалов в футеровке агрегатов ковш-печь / Л.М.Аксельрод, С.В.Бочаров, С.Г.Савченко [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*.- 2004.- №7.- С.45-52.
2. Баррет Дж.О. Продление кампании сталеразливочных ковшей на заводе фирмы «Bethlehem Steel» в Спарроус-Пойнте / Дж.О. Баррет, Р.Е. Фаш, Т. Рихтер // *Новости черной металлургии за рубежом*.- 2004.- №4. – С.77-79.
3. Величко А.Г. Причины износа периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочных ковшей /А.Г.Величко, Б.М.Бойченко, В.Г.Порохнявый [и др.]//*Черная металлургия*.- 2009.- №1. – С.65-67.