

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

10

Издается с января 1958 г. ежемесячно

2011

МОСКВА • МНСНС • 2011

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ноздрин И.В., Шириева Л.С. Термодинамический анализ процессов плазменного синтеза карбида хрома	3
Кашин В.В., Шакиров К.М., Пошевнева А.И. О капиллярной постоянной и ее применимости при расчетах поверхностного натяжения жидкостей	8
Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Шириева Л.С., Терентьева М.А. Синтез и эволюция дисперсности боридов и карбидов ванадия и хрома в условиях плазменного потока	12
Фастыковский А.Р., Волков К.В., Перетягко В.Н., Ефимов О.Ю., Чинокалов В.Я. Совершенствование технологии производства арматурных профилей на непрерывных мелкосортных станах	18
Горев Б.В., Панамарев В.А., Перетягко В.Н. Об уравнениях ползучести, описывающих горячее формоизменение металлов при непрерывном и прерывистом деформировании. Сообщение 2	21
Филиппова М.В., Бахаев А.В., Перетягко В.Н., Федоров А.А. Моделирование безоблойной штамповки из шаровой заготовки	24
Ахметов Д.В., Токовой О.К., Шабуров Д.В., Артюшов В.Н., Кап.лунбова М.Н. Исследование ликвационных трещин в заготовке высокоуглеродистой стали методом растровой электронной микроскопии	27
Берсенева И.С., Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Клейн В.И., Боквинов Б.А. Определение резервов экономии твердого топлива при агломерации железных руд	30
Темляничев М.В., Матвеев М.В., Темляничева Е.Н. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров	32
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	
Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Громов В.Е., Воробьев С.В., Коновалов С.В. Повышение усталостного ресурса нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой	37
Сарычев В.Д., Ефимов О.Ю., Танг Гуон. Математическое моделирование распределения температуры при воздействии плазменных потоков в технологии упрочнения прокатных валков	39

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Гладких И.В., Волынкина Е.П. Методология оценки качества техногенного сырья при производстве огнеупорных и теплоизоляционных материалов для металлургии	42
---	----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Никитин А.Г., Чайников К.А., Зиновьева Е.В. Условие возбуждения упругих колебаний (вибраций) в механической системе под действием сброса нагрузки	46
Соколов П.Д., Корочкин А.Е. Влияние защитных газовых сред на структуру шва при сварке нержавеющей стали	47
Бессонов Д.А., Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф. Повышение усталостной долговечности стали 20Х13 электронно-пучковой обработкой	48

ПО МАТЕРИАЛАМ VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»
Г. МАРИУПОЛЬ, СЕНТЯБРЬ 2010 Г.

Волошин В.С., Харлашин П.С., Чауэри Т.М., Григорьева М.А., Расказова Е.Г. Актуальные проблемы производства черных металлов как необходимость развития фундаментальных исследований	50
Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Ганзер Л.А. Исследование процессов массо- и теплопереноса в промежуточном ковше современной машины непрерывного литья заготовок	54
Камкина Т.В., Яковлев Ю.Н., Стомба Я.В., Камкин В.П. Численная оценка изменения концентраций углерода и кислорода по высоте металла при ковшовой обработке	58
Смирнов А.Н., Салмаш И.Н., Ошовская Е.В. Исследование тепло- и массообменных процессов в агрегате ковш-печь завода «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» (шлаковый и подшлаковый пояс)	61
Бакст В.Я., Харлашин П.С., Тарасюк Л.И., Яценко А.Н., Чемерис Н.О. Расчет линейной скорости и продолжительности плавления лома в распадах Fe - C	64
Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Крикент И.В., Самохвалов С.Е., Чичерин А.Г., Гнып Р.Р. Изучение массопереноса железоуглеродистого расплава при обработке на установке ковш-печь постоянного тока	66
Памяти Юрия Викторовича Баранова	70

УДК 669.18:536.24

© 2011 г. А.Н. Смирнов, И.Н. Салмаи, Е.В. Ошовская

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

Современный агрегат ковш-печь имеет устоявшуюся архитектуру и конструкцию. Такой агрегат состоит из системы для нагрева металла электрической дугой, системы подачи ферросплавов и материалов для рафинирования стали в ковше, средств для перемешивания металла инертным газом и т.п. Функционально все операции по доводке и рафинированию стали выполняются в сталеразливочном ковше, что, безусловно, накладывает дополнительные требования к его футеровке. На практике длительность обработки в агрегате ковш-печь может составлять от 25 – 30 мин до 2 – 4 ч и более (при специальных условиях обработки). В процессе обработки подогрев стали в ковше может составлять 50 – 120 °С 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 оксида магния более 97 %, имеющие в своем составе комбинированные антиоксиданты и синтетические связки [1].

Основными причинами вывода шлакового пояса из эксплуатации являются износ рабочего слоя футеровки и 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: во-первых, механическим

разрушением (скалыванием) части огнеупора вследствие действия внутренних термомеханических напряжений, вызванных неравномерным прогревом различных участков футеровки; во-вторых, химической эрозией, вызванной химическим взаимодействием материала огнеупорных изделий с отдельными компонентами, входящими в состав расположенного на зеркале металла шлака. Как правило, эти два фактора действуют совместно. При этом дополнительной технологической нагрузкой является нарушение нормальных условий эксплуатации футеровки, например, ее переохлаждение между наливками. Учитывая тот факт, что при сливе стали из ковша (этот период может составлять 40 – 60 мин и более) шлаковый пояс оголяется первым, то его охлаждение происходит в максимально длительный период времени и его охлаждение максимально по сравнению с охлаждением других элементов футеровки.

На рис. 1, а показан шлаковый пояс сталеразливочного ковша после достаточно большого количества наливов, в котором разрушение произошло вследствие механических скалываний кирпичей и одновременно химической эрозии. Следует обратить внимание на тот факт, что разрушение футеровки произошло преимущественно по швам между штучными изделиями. На рис. 1, б показан износ шлакового пояса вследствие химической эрозии, 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.

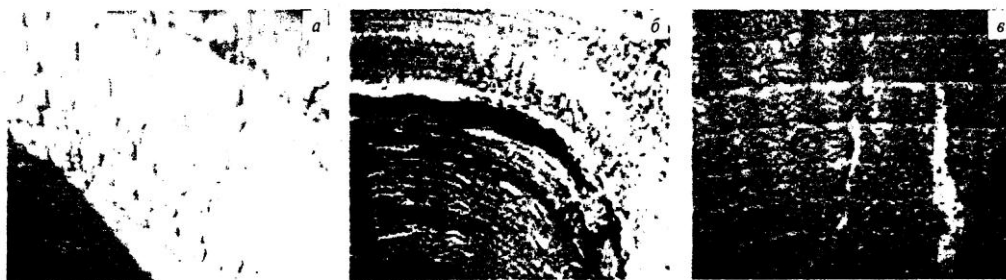


Рис. 1. Внешний вид шлакового пояса 120-т сталеразливочного ковша при механическом скалывании штучных изделий после 32 циклов обработки на агрегате ковш-печь (а), при химической эрозии с затеканием стали в ложбину (б), вид вертикальной трещины в футеровке стены сталеразливочного ковша (в)

Для футеровки стен и дна используются преимущественно периклазоуглеродистые штучные изделия с несколько меньшим содержанием оксида магния. 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. 1, в). 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 800 – 1000 °С и ниже, а температура стали на выпуске может достигать 1550 – 1590 °С. Такая разность температур может оказаться достаточной для эффекта термоудара при заполнении ковша сталью. Повышенный износ локальных зон футеровки следует объяснить 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 термическими напряжениями прочностных свойств огнеупоров происходит их разрушение, образуются сколы и трещины.

Для качественного и количественного исследования описанных процессов выполнено математическое моделирование термонапряженного состояния футе-

ровки сталеразливочных ковшей вместимостью 120 и 75 т. Механические характеристики (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент линейного расширения) огнеупорных материалов приняты в соответствии с паспортами этих огнеупоров, 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 °С и свободной конвекции на поверхности кожуха. В результате расчета получены картины деформаций и напряжений (рис. 2) в футеровке ковшей.

Установлено, что под действием термической нагрузки происходит расширение стенок футеровки в радиальном направлении: в 120-т ковше на 16 мм, в 75-т ковше на 15 мм. Днище ковша деформируется: центральная часть 120-т и 75-т ковша перемещается вверх на 8,0 и 5,5 мм, а периферийная – вниз на 7,5 и 7,0 мм соответственно, т.е. происходит так называемое «коробление» днища. Величина суммарных деформаций для обеих ковшей практически одинакова, хотя картины деформаций имеют некоторые отличия, особенно в придонной части и зоне днища: это 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. В зоне шлакового пояса деформация затрагивает практически всю толщину кладки, а в слоях футеровки стенок деформация почти в два раза ниже.

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 120-т и 75-т ковшей возникают напряжения 70 – 150

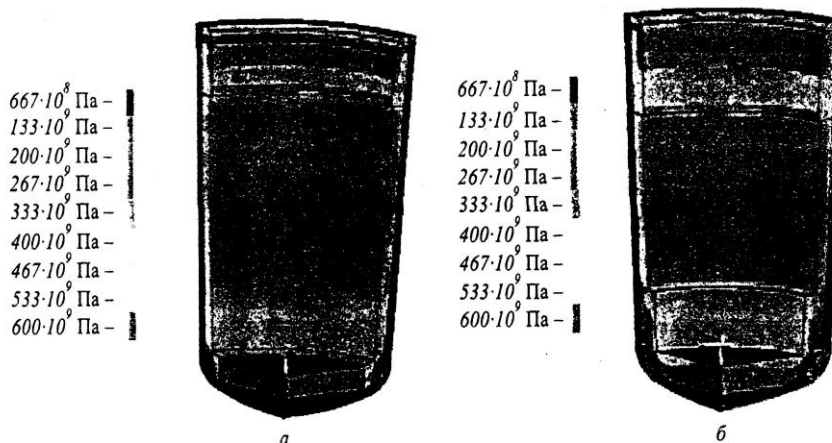


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в футеровке ковша емкостью 120 т (а) и 75 т (б) при температуре внутренней стенки 1600 °С

и 100 – 200 МПа соответственно. В первом слое футеровки подшлакового пояса напряжения еще выше (до 250 МПа), но занимают 1/3 – 1/2 толщины первого слоя.

В зоне днища 120-т ковша напряжения ниже (не более 100 МПа), а уровень напряжений в придонной зоне и днище 75-т ковша сопоставим с напряжениями в зоне шлакового пояса. Концентраторы напряжений наблюдаются в местах выступов футеровки и переходов от стен к днищу. Напряжения в арматурном слое футеровки в два – три 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 разрушение футеровки.

Аналогичным образом было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния футеровки ковшей при действии теплового потока плотностью 5500 Вт/м²; такое состояние соответствует 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 напряжений, являющиеся местами зарождения трещин, возникают в местах выступов кладки. Суммарные деформации футеровки 120-т и 75-т ковшей составляют 15 и 13 мм соответственно. Напряжения, возникающие в кожухе, составляют 300 – 500 МПа (большие значения соот-

ветствуют области днища и местам крепления опорного кольца и цапф), что близко к пределу выносливости материала кожуха. При многократном нагружении возможна потеря 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 %-ом 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 °С при потере толщины футеровки на 30 % и на 100 °С при потере толщины футеровки на 60 %; температура арматурных слоев увеличивается на 20 и 70 °С, а температура кожуха – на 30 и 50 °С соответственно. На рис. 3 показано изменение температуры в футеровке шлакового пояса и подшлакового слоя (сечения 5 и б). Значения температур в футеровке зоны днища и стен остаются практически без изменения, только температура кожуха повышается на 5 – 10 °С. При износе 30 % повышенные напряжения отмечаются и в подшлаковом слое, и в верхней части стенки ковша, а при износе 60 % высокая напряженность отмечается не только в зоне износа, но и во всех слоях футеровки.

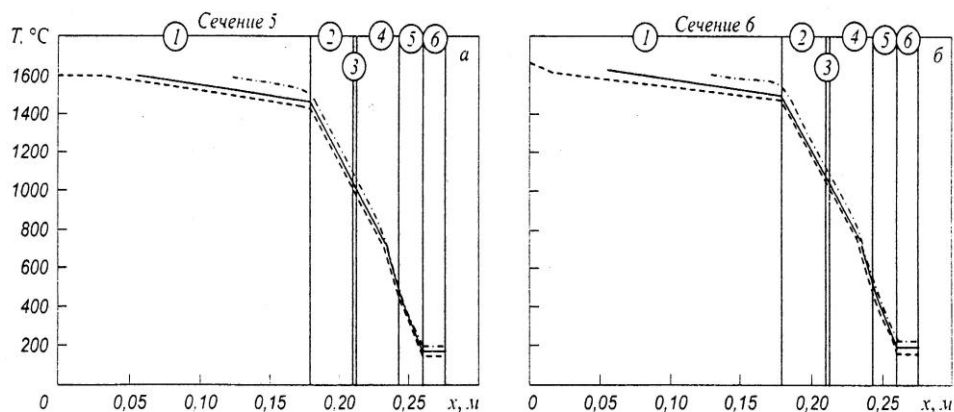


Рис. 3. Изменение температуры в футеровке подшлакового слоя (а) и шлакового пояса (б) в исходном состоянии (---) при износе 30 % (—) и 60 % (-·-·-) для материала:

- 1 – периклазоуглеродистый огнеупор, содержащий 99,3 % MgO; 0,4 % CaO; 0,2 % Fe₂O₃; 0,05 % SiO₂; 10 % C;
 2, 4 – алюмосиликатный огнеупор, содержащий 86 % Al₂O₃; 9,5 % SiO₂; 1 % Fe₂O₃; 2,9 % TiO₂; 3 – мертель шамотный;
 5 – периклазовый огнеупор, содержащий 97,05 % MgO; 1,3 % CaO; 0,65 % Fe₂O₃; 0,55 % SiO₂; 5,5 % C; 6 – масса бетонная

Выводы. При изнашивании (локальном разрушении) рабочего слоя футеровки в большей или меньшей степени происходит 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.

УДК 669.184.132

© 2011 г. В.Я. Бакст, П.С. Харлашин, Л.И. Тарасюк,
А.Н. Яценко, Н.О. Чемерис

РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЛОМА В РАСПЛАВАХ Fe – C

Проблемы ресурсо- и энергосбережения в металлургической отрасли практически всех государств постсоветского пространства требуют оперативной замены технологий мартеновского передела и его разновидностей на менее затратные способы производства стали. Альтернативой подовым технологиям в настоящее время могут быть электроплавка или кислородное конвертирование, причем в последнем случае различные варианты технологических схем не только достаточно опробованы, но и в значительной степени оптимизированы.

Основными направлениями интенсификации конвертерных процессов следует считать повышение темпа подачи кислорода и сокращение длительности операции продувки. Технологически необходимо полное расплавление стального лома по истечении примерно 2/3 времени продувки. Поэтому становится понятным интерес к получению достоверных зависимостей, характеризующих тепло- и массообменные процессы, сопровождающие переход скрапа в жидкое состояние. Выполнение теоретического анализа процесса плавления требует предварительной оценки величин соответствующих коэффициентов теплопередачи.

При рассмотрении внешней задачи в настоящей работе предпринята попытка применения результатов промышленных экспериментов для получения критерияльной зависимости вида $Nu = k Re^m Pr^n$, где Nu , Re и Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; k , m и n – коэффициенты. Используются результаты исследования линейной скорости перехода скрапа в жидкое состояние [1] с изменением методики расчета коэффициента теплоотдачи (α). Учитывается обстоятельство, что при температурах ванны, превышающих температуру ликвидуса лома, расплавление последнего происходит без науглероживания поверхностных слоев [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксельрод Л.М., Бочаров С.В., Савченко С.Г. и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2004. № 7. С. 45 – 52.
2. Баррет Дж.О., Фаш Р.Е., Рихтер Т. // Новости черной металлургии за рубежом. 2004. № 4. С. 77 – 79.
3. Величко А.Г., Бойченко Б.М., Порохнявый В.Г. и др. // Черная металлургия. 2009. № 1. С. 65 – 67.

Донецкий национальный технический университет. Поступила 5 апреля 2011 г.

Удельный расход тепла на нагрев и плавление ($q_{\text{потр}}$) определяется по формуле

$$q_{\text{потр}} = c_d(t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) + q_{\text{скр}} + c_p(t_p - t_{\text{пов}}),$$

где c_d и c_p – средняя теплоемкость лома и расплава, кДж/(кг·К); t_p , $t_{\text{пов}}$ и $t_{\text{нач}}$ – температура расплава, поверхности плавящегося лома и начальная температура лома, °С; $q_{\text{скр}}$ – скрытая теплота фазового превращения, кДж/кг.

При условии (для низкоуглеродистого лома) $t_{\text{пов}} = 1510 \text{ } ^\circ\text{C} = \text{const}$ значение α вычисляли с использованием уравнения

$$\alpha(t_p - t_{\text{пов}}) = v_x \rho_d q_{\text{потр}}, \quad (1)$$

где v_x – линейная скорость плавления скрапа, м/с; ρ_d – плотность лома, кг/м³.

Физические характеристики жидкой фазы, в которой протекают процессы переноса энергии и вещества, изучены достаточно подробно в широких интервалах изменения температуры и состава расплава, поэтому определение величин тепловых и диффузионных чисел Прандтля не вызывает затруднений.

Число Рейнольдса зависит от скорости движения потока, относительно величины которой у специалистов нет единого мнения. Имеющиеся литературные данные отличаются на порядок и более (например, 0,3 – 0,6 м/с [3] и 4,3 – 6,0 м/с [4]).

Кроме того следует указать, что применительно к некоторым технологиям характеризовать перемещение расплава как циркуляционное не корректно. Скорее всего, в этом случае имеют место турбулентные пульсации, когда скорость потока жидкого металла может