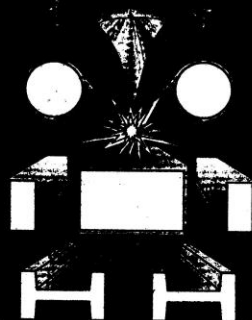


ISSN 0543-5749

Металлургическая и горнорудная ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



2004

№ 8

Выводы

В отличие от прежних попыток решить обратную задачу металлургического производства подходом использованием фазовых операторов является универсальным: с его помощью с равным успехом можно оптимизировать завалку, плавление, окисление, рафинирование, доводку, раскисление и легирование металла. Не ограничен он также и типом сталеплавильного агрегата, в котором реализуется процесс, так как физические и химические закономерности поведения системы «металл-шлак-газ» в электродуговых печах, мартеновских печах, конвертерах, ковшах и установках «ковш-печь» имеют одну и ту же природу. Кроме того, в рамках предложенного подхода представляется возможным работать со спокойной, полуспокойной и кипящей сталью.

Разработанный метод фазовых операторов применяется в новых компьютерных программах EXCALIBUR и GIBBS®, которые являются интеллектуальным ядром проектируемых систем управления выплавкой и внепечной обработкой, легированием и раскислением стали на ряде металлургических предприятий.

Библиографический список

1. Канторович Л. В. Математические методы организации и планирования производства. - Л. - 1939.
2. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Храпко С. А., Иноземцева Е. Н. Разработка информационной технологической системы «Форвард» для управления металлургическими процессами в реальном масштабе времени // Известия ВУЗов. Черная металлургия. - 1991. - № 12. - С. 89-91.
3. Колосов А. Ф., Литвин Л. М., Лукьянченко В. В., Перевалов Н. Н., Филимонов М. А. Освоение системы «Электронный советчик сталевара» на металлургическом заводе «Серп и молот» // Сталь. - 1989. - № 3. - С. 46-47.
4. Фомин Н. А., Чухов И. И., Кошелев А. Е., Киселева Т. В., Тежиков В. Н. Автоматизированная система расчета шихты при производстве стали в мощных электропечах // Сталь. - 1989. - № 3. - С. 45-46.
5. Евченко В. Г., Корнаушенко И. И., Королева М. К., Литвин Л. М., Лукьянченко В. В. Внедрение системы оптимального расчета шихты при выплавке легированной стали // Сталь. - 1990. - № 8. - С. 42-44.
6. Смирнов А. П. Методы оптимизации. - Москва. - МИСиС. - 2002. - 135 С.
7. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. - М. - Высшая школа. - 2001. - 176 С.
8. Пономаренко А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему // ЖФХ, 1974, Т.48, № 7, С. 668-674; № 8, С. 950-958.
9. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2002. - № 10. - С. 131-137.

© А.В. Харченко, 2002

♦ Моделирование температурных полей в сталеразливочном ковше агрегата ковш-печь

Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш

Донецкий национальный технический университет

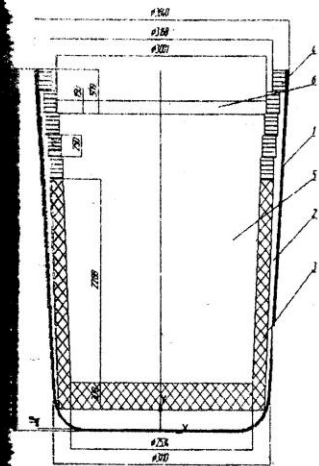
В настоящее время в состав агрегатов ковш-печь входят средства для перемешивания металла инертным газом, система нагрева металла электрической дугой, система подачи ферросплавов и материалов для рафинирования стали в ковше, система доводки стали по химическому составу.

агрегат «ковш-печь», моделирование, разрушение футеровки

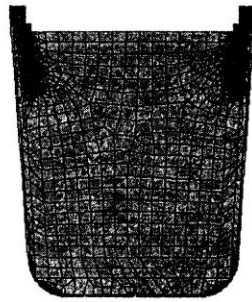
Важнейшим технологическим элементом, обеспечивающим качество жидкой стали в современном сталеплавильном цехе, является агрегат ковш-печь, в котором выполняется не только перемешивание металла в ковше, но и его подогрев посредством электрической дуги. Соответственно такая обработка металла в сталеразливочном ковше обуславливает формирование дополнительных термомеханических нагрузок на футеровку ковша. В конечном счете внепечная обработка стали способствует повышенному износу футеровки ковша и увеличению удельных затрат на огнеупоры.

Многочисленными исследованиями установлено, что в процессе доводки металла на агрегате ковш-печь происходит локальный повышенный износ огнеупорной футеровки, в том числе и в зоне шлакового пояса. Одной из причин повышенного износа шлакового пояса, по нашему мнению, является образование шлака и металла в ходе обработки, что существенно изменяет термонапряженное состояние футеровки сталеразливочного ковша в целом. Следовательно, для эксплуатации сталеразливочного ковша агрегата «ковш-печь» представляется важным знать, каким образом распределяются температурные поля в футеровке ковша, ванне жидкой стали и шлака в различные периоды обработки.

В настоящей статье представлены методика и результаты математического моделирования распределения температурных полей в агрегате ковш-печь.



1. Модель агрегата печь-ковш: 1 - стальной кожух; 2 - шинельная масса; 3 - доломитомagneзитовый кирпич; 4 - периклазоуглеродистый кирпич; 5 - жидкая сталь; 6 - шлак



2. Конечно-элементная модель агрегата печь-ковш

ния температуры в элементах сталеразливочного ковша агрегата ковш-печь в установленном режиме. Моделирование термического и напряженного состояния элементов агрегата печь-ковш проводилось с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в прикладном пакете ANSYS.

Геометрическая модель сталеразливочного ковша агрегата ковш-печь включала в себя собственно металлургическую футерованную емкость, а также жидкую сталь и шлак. Футеровка сталеразливочного ковша агрегата ковш-печь была выполнена из периклазоуглеродистого кирпича в зоне шлакового пояса и верхней части рабочей зоны, доломитомagneзитового кирпича в основной части рабочей зоны и днище, а также шинельной массы. На рис.1 приведена модель сталеразливочного ковша агрегата ковш-печь с указанием перечисленных компонентов.

Моделирование выполнялось в два этапа.

В первом этапе решалась задача о термическом состоянии футеровки ковша. При этом рассматривались условия нестационарной теплопроводности, соответствующие выдержке наполненного ковша. Постановка задачи сформулирована следующим образом.

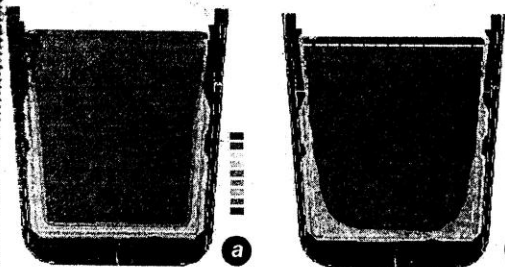
Ковш наполнен жидкой сталью, на поверхности металла расположен слой шлака определенной толщины. Температура жидкой стали — 1620 °С, а температура шлака — 1660 °С. Внутренние стенки ковша нагреваются до температуры 1000 °С, температура внешней среды равна 30 °С. Теплопередача осуществляется от сплава к внутренней стенке, дну ковша и шлаку; от шлака к внутренней стенке ковша. Кроме того, протекают процессы теплоотдачи излучением от кожуха и зеркала шлака в окружающую среду. Длительность периода выдержки наполненного ковша составляла 10 мин.

Теплофизические свойства осесимметричной плоской модели установки ковш-печь, приведенной на рис.1, описывались следующими характеристиками: плотность ρ (кг/м³), коэффициент теплопроводности λ (Вт/(м·К)), удельная теплоемкость c (Дж/(кг·К)), коэффициент теплоотдачи h (Вт/(м²·К)). Исходные значения данных величин были приняты согласно литературным данным [1–2]. Конечно-элементная модель сталеразливочного ковша состояла из 5556 конечных элементов типа PLANE 55, что соответствует четырехузловому плоскому конечному элементу с тепловыми свойствами (рис. 2).

В результате решения задачи было получено распределение температуры во всех рассмотренных компонентах сталеразливочного ковша (рис.3) и диаграммы распространения теплового потока (рис.4) и градиента температуры.

Установлено, что по мере нагрева футеровки ковша происходит следующее. Интенсивный тепловой поток, возникший на границе жидкая сталь (шлак) внутренняя стенка футеровки (рис. 4,а), вызывает прогрев внутренних слоев футеровки при одновременном понижении температуры стали и шлака в прилегающих слоях (рис. 3,а). При чем более динамичная теплопередача отмечается в зоне, футерованной периклазоуглеродистым кирпичом. В течение первых 60 с футеровка из периклазоуглеродистого кирпича прогревается практически на всю его ширину, диапазон изменения температуры составляет 1130 - 32 °С в зоне стенок и 1470 - 70 °С в зоне днища ковша. При этом стенки, футерованные доломитомagneзитовым кирпичом,греваются только на глубину 1/5 - 1/4 ширины кладки, но диапазон температур этой зоны составляет 980 - 28 °С (рис. 5). Отмеченные явления объясняются различными теплофизическими свойствами

используемых материалов, а именно, более высокой (почти в 10 раз) температуропроводностью периклазоуглеродистого кирпича, что при одинаковой интенсивности тепловых потоков приводит к более быстрому его прогреву. Однако, наличие в доломитомagneзитовом кирпиче соседних слоев с резким перепадом температуры (от 1000 °С до 30 °С) приведет к неравномерному его расширению, образованию локальных концентраторов напряжений и, как следствие, будет вызывать развитие трещин в зоне контакта с жидкой сталью и шлаком, в то время как футеровка из периклазоуглеродистого кирпича, прогреваясь на всю глубину, будет расширяться и деформироваться более



3. Распределение температуры в компонентах модели через момент времени: а) - 1 мин.; б) - 10 мин.

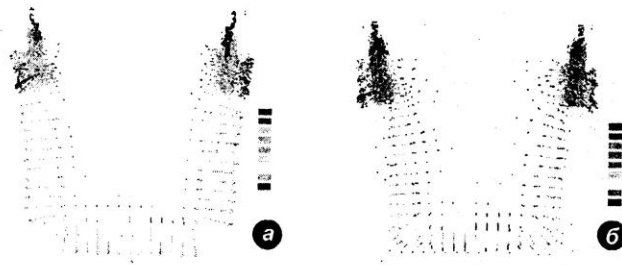


Рис. 4. Диаграммы теплового потока: а) - через 1 мин.; б) - через 10 мин.

ментах футеровки ковша, а также в стали и шлаке. Однако, в зоне ковша, футерованной периклазоуглеродистым кирпичом, увеличивается ширина слоев стали, температура которых снизилась на 200°C от исходной. Это объясняется тем, что интенсивность теплового потока снижается почти в 3 раза (рис. 4,б), но в процессе теплообмена увлекаются слои стали, расположенные ближе к оси симметрии ковша. Кроме того, в зоне футерованной доломитомagneзитовым кирпичом, происходит постепенный прогрев более дальних слоев ($1/4 \dots 1/3$ ширины кладки), что возможно будет приводить к остановке развития трещин.

Таким образом, полученная картина распределения температурных полей футеровки ковша свидетельствует о том, что при определенных условиях различные слои футеровки будут расширяться на различные величины, что может способствовать повышенному разрушению огнеупоров на границах различных зон (например, на границе зоны шлакового пояса и футеровки стенок ковша).

На втором этапе исследования определялись напряжения и деформации в элементах футеровки установки печь-ковш, вызываемые воздействием температурных полей. Конечная модель установки состояла из 4991 конечных элементов. В качестве механических характеристик шпательной массы, доломитомagneзитового и периклазоуглеродистого кирпича использовались: модуль упругости, модуль Пуассона, коэффициент линейного расширения. Так как на первом этапе было установлено, что стальной кожух ковша практически не нагревается, ограничение на перемещение было приложено к его внешней поверхности. В качестве нагрузки на элементы футеровки использовалась температурная нагрузка, полученная при решении задачи о нестационарной теплопроводности.

Моделирование показало, что при выдержке ковша, наполненного сталью, происходит термическое расширение футеровки (рис. 6).

Наибольшей деформации подвержены участки, футерованные доломитомagneзитовым кирпичом. В этой зоне происходит расширение с одновременным сдвигом соседних слоев кладки. Суммарная максимальная деформация через 60 с составляет $0,64 \text{ мм}$. Причем в зоне шлакового пояса деформация затрагивает практически всю толщину кладки, а для слоев кирпича, находящихся в контакте со сталью, деформация выражена только на глубине до $1/4$ толщины кладки. Кроме того, в результате сдвига в месте перехода периклазоуглеродистому кирпичу, наблюдается его сжатие, что в результате приводит к возникновению развитию трещин и раскрашиванию футеровки. Напряжения, вызванные такими деформациями, превышают допустимые, что также свидетельствует о разрушении футеровки в рассмотренной зоне. Полученные результаты подтверждают выводы о характере возможных разрушений футеровки, сделанные на этапе изучения температурных полей.

В целом участки футеровки, выполненные из периклазоуглеродистого кирпича (рабочая зона и днище) деформируются в меньшей степени. Через 60 с выдержки суммарная деформация в этих зонах составляет $0,14-0,28 \text{ мм}$. Центральная часть футеровки днища практически не деформируется.

Расчеты показали, что дальнейшая выдержка ковша приводит к росту деформаций и напряжений футеровки, так через 10

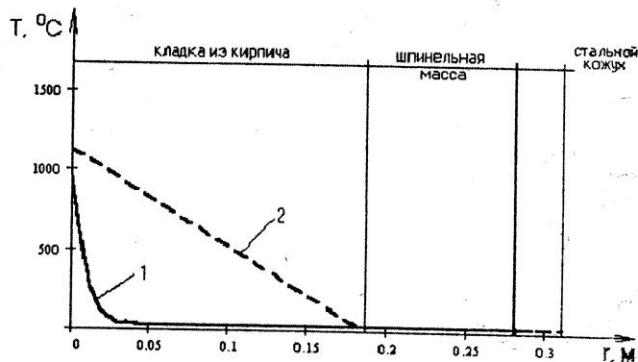


Рис. 5. Изменение температуры футеровки ковша в разных зонах через 60 с после начала выдержки: 1 - доломитомagneзитовый кирпич; 2 - периклазоуглеродистый кирпич

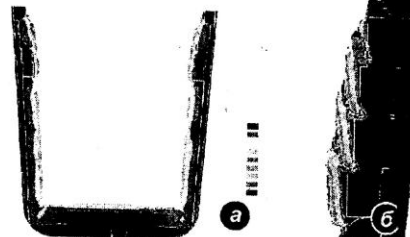


Рис. 6. Картина деформации футеровки ковша через 60 с

и суммарная деформация возрастает почти в 2 раза.

Таким образом, полученная картина позволяет сделать вывод о возможных местах, причинах возникновения и характере развития повреждений футеровки установки печь-ковш в зоне шлакового пояса и в процессе перехода с доломитомagnesитового к периклазоуглеродистому кирпичу, которые в конечном итоге приводят к ее разрушению.

Выводы

Получено распределение температурных полей в жидкой стали, шлаке и футеровке в различные моменты времени, а также установлена картина деформаций и напряжений элементов футеровки установки печь-ковш, вызванных термическими нагрузками. Анализ результатов моделирования позволил выявить места, причины и характер возможного разрушения футеровки.

Библиографический список

1. Моделирование температурных полей в сталеразливочных ковшах с футеровкой из доломитовых кирпичей или высокоглиноземистой массы/Волкова О., Янке Д. // Черные металлы. – 2003. - № 2. - С. 26-31.
2. Огнеупорное производство / Под общ. ред. Д.И. Гавриша.- М.:Металлургия, 1965.- ТТ.1-2.

© Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, 2004 г.

Оптимизация режимов продувки жидкого металла в сталеразливочных ковшах

Л. Еронько /к.т.н./, А.Н.Смирнов /д.т.н./, И. Н. Салмаш

Донецкий национальный технический университет,

Л. Кукуй /к.т.н./, А. Ю. Цупрун

ООО "ДОНИКС"

стала очевидна необходимость дальнейшего совершенствования технологии инжекционной обработки жидкого металла в разливочных ковшах, эксплуатируемых в составе установок "ковш-печь". Освещены результаты лабораторных экспериментов, проводившихся с целью обоснования оптимальных режимов продувки расплава через несколько пористых пробок, установленных в днище ковша. Доказано, что при использовании дискретных режимов подачи газа к донным продувочным устройствам по заранее установленной программе удается сократить время гомогенизации перемешиваемой жидкостной системы, снизить продолжительность и поверхность контакта покровного шлака с футеровкой ковша.

Ключевые слова: продувка, инертный газ, перемешивание, скорость циркуляции, время гомогенизации

Начало всестороннему изучению процесса взаимодействия газовых струй с жидкой металлургической ванной, продуваемой инертным или неинертным газом, было положено в 70-е годы прошлого века, когда осваивались способы инжекционной обработки стали в разливочных ковшах. Среди многочисленных работ того времени, посвященных описанию качественной и количественной картины газо-гидродинамических явлений, протекающих во время перемешивания жидкого металла вдуваемым газом, следует особо отметить работы Е.Т.Турклогана, Дж. Зекели, М. Сано, К. Мори, В.И. Явойского, В.И. Баптизманского, В.Б. Охотинского. Приведенные в них результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили не только объяснить физическую сущность процессов тепломассопереноса, обусловленных взаимодействием газовой и жидкой фаз, и охарактеризовать структуру циркуляционных потоков, но и выдать практические рекомендации по выбору места размещения продувочного узла и назначению длительности подачи газа - энергоносителя для различных условий продувки [1-4].

Структурные изменения, произошедшие в современном сталеплавильном производстве, потребовали продолжения работ, связанных с повышением эффективности вторичной металлургии. Наметившийся рост числа установок "ковш-печь", вводимых в эксплуатацию на отечественных металлургических предприятиях, а также увеличение стоимости энергоносителей и огнеупорных изделий, потребляемых при получении в этих установках стали заданного химического состава из предварительно выплавленного полупродукта, стали главными причинами актуальности проблемы, связанной с необходимостью обеспечения баланса между затратами на проведение технологических операций и достигаемым эффектом.

В связи с этим при назначении режима продувки необходимо учитывать не только поставленные цели (гомогенизация химического состава и температуры металла или повышение эффективности его взаимодействия со шлаком для обеспечения успешной десульфурации), а и условия протекания в жидкой ванне газо-гидродинамических процессов, при которых достигается максимально возможный эффект перемешивания при минимальных временных, материальных и энергетических затратах.

Практика эксплуатации разливочных ковшей, в которых осуществляли регулярно внепечную обра-