

На правах рукописи

ЗОК

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени Ленинского комсомола

УСТОГОВ Анатолий Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ  
НА СТОЙКОСТЬ СВОДОВ МАРТЕНОВСКИХ И ДВУХВАННЫХ  
ПЕЧЕЙ

Специальность 05.16.02 -  
"Металлургия черных металлов"

Челябинский  
политехнический институт  
**БИБЛИОТЕКА**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой  
степени кандидата  
технических наук

Челябинск - 1973

Работа выполнена в Челябинском научно-исследовательском институте металлургии.

Научный руководитель - старший научный сотрудник кандидат технических наук В.Н.Тулусевский.

Официальные оппоненты:

профессор доктор технических наук В.Г.Антипин,  
доцент кандидат технических наук Л.Г.Королев.

Ведущее предприятие -

Череповецкий металлургический завод.

Автореферат разослан " " 197 г.

Задита диссертации состоится " " 197 г.

в 15 часов на заседании Совета по присуждению ученых степеней металлургического факультета Челябинского политехнического института (г.Челябинск, проспект В.И.Ленина, 76, аудитория ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454044, г.Челябинск, 44, проспект В.И.Ленина, 76.

Ученый секретарь Совета  
доцент кандидат технических  
наук

*Мончар ГОНЧАР В.Н./*

В 1972г в нашей стране было выплавлено 126 млн.т стали. Директивами XXII съезда КПСС предусматривается увеличение выплавки стали к концу пятилетки до 142-150 млн.т в год. При этом дальнейший прирост производства марганцовской стали (доля которой в общей выплавке в настоящее время превышает 70%) должен быть получен без введения в строй новых цехов и печей путем повышения производительности действующих агрегатов за счет интенсификации плавки и автоматизации процесса.

Интенсификация плавки кислородом значительно ухудшает условия службы огнеупорной кладки. За последние годы стойкость марганцевых печей, работающих с продувкой ванны, снизилась примерно вдвое. Падение стойкости печей создает большие трудности в организации их ремонтов, снижает производительность агрегатов, повышает расход огнеупоров и, в конечном счете, значительно ухудшает эффективность интенсификации марганцевого процесса.

Длительный опыт работы марганцевых и двухванных печей показал, что преимущественное влияние на стойкость сводов оказывают условия их эксплуатации. Однако количественная оценка влияния различных эксплуатационных факторов на стойкость сводов, в следствии, и выбор оптимальных режимов работы печей сильно затруднены отсутствием приемлемых для практики способов контроля скорости износа сводов. Созданию надежных технических средств для такого контроля и изучению на этой основе влияния важнейших эксплуатационных факторов на стойкость сводов марганцевых и двухваных печей и посвящается настоящая работа, выполненная в Челябинском научно-исследовательском институте металлургии.

Диссертация содержит 102 стр.текста, в том числе введение, четыре главы, заключение, выводы; список литературы из 142 наименований, 64 рисунка и 9 таблиц.

## I. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что срок службы основных сводов определяют три группы факторов: конструктивные факторы, факторы, характеризующие свойства применяемых огнеупоров, и наконец, эксплуатационные факторы, определяющие основные условия эксплуатации. Проведенный анализ стойкости марганцевых печей емкостью от 130 до 600т на различных заводах за период 1966-1972гг дает основание считать, что наблюдаемое ухудшение стойкости печей определяется в основном неблагоприятными изменениями условий эксплуатации.

Исследование влияния эксплуатационных факторов на стойкость сводов марганцевых и двухванных печей в условиях интенсификации процесса посвящено большое число работ, выполненных Всесоюзным и Украинским научно-исследовательскими институтами огнеупоров, ВОСТИО и рядом других институтов и заводов. Получены важные в теоретическом и практическом отношениях результаты. Однако, многие вопросы, имеющие первостепенное значение, остаются малоизученными. Это относится, в частности, к влиянию на стойкость сводов такого важного эксплуатационного фактора, как температурный режим рабочего пространства. Систематическое изучение зависимости скорости износа огнеупоров от температурного режима сводов стало возможным лишь в последнее время с появлением нового датчика для контроля температуры - шомпольного гермозонда конструкции НИИМ. Внедрение термозондов на многих заводах, по-существу, впервые дало надежные данные для сопоставления температурных режимов и стойкости печей различных цехов. Ранее вопросам влияния температурных режимов сводов на их стойкость не уделялось должного внимания.

Нами была предпринята попытка статистической обработки данных, полученных при применении гермозондов, с целью нахождения дифференцированной количественной оценки влияния на стойкость свода его средней температуры и отклонений от нормального температурного режима. Анализ зависимостей скорости износа свода  $\sigma$  (в мм за плавку - мм/пл) от рассмотренных факторов температурного режима показал, что наибольшее влияние на износ свода оказывают средняя температура свода за жидкие периоды  $t_{cs}^*$  ( $^{\circ}$ С), длительность перегревов выше  $1750^{\circ}$ С -  $\tau_1$  (ч/суг) и частота переохлаждений свода ниже  $1450^{\circ}$ С -  $n_2$  (1/суг). Коэффициенты корреляции  $\gamma$  соответственно равны 0,89; 0,82 и 0,78. Полученное уравнение множественной регрессии

$$\sigma = 0,0052 t_{cs}^* + 0,062 \tau_1 + 0,0082 n_2 - 8,18 \quad (I)$$

подтверждает существенное влияние температурного режима на стойкость свода марганцевых печей. Этот вопрос, очевидно, требует специальных исследований.

Весьма противоречивы известные данные о влиянии интенсивности продувки ванны кислородом на стойкость печей. Во многих случаях, даже при продувке со средней интенсивностью, наблюдалось резкое падение стойкости. Однако, известны примеры, когда внедрение продувки (в частности, на Челябинском металлургическом заводе (ЧМЗ) не оказалось существенного влияния на стойкость. Двухванные печи ММК, несмотря на предельно высокую интенсивность продувки,

отличаются весьма высокой стойкостью, примерно вдвое превышающей стойкость марганцевых печей, работающих с умеренной интенсивностью продувки ванны, а также стойкость однотипных двухванных печей Череповецкого металлургического завода (ЧерМЗ). Все эти факты не находили вполне удовлетворительного объяснения.

Не существует единого мнения о самом механизме процессов разрушения оgneупоров в сводах марганцевых и двухванных печей. До последнего времени считалось установленным, что главным видом износа сводовых оgneупоров является скаливание. Основные усилия направлялись на изучение механизма и условий процесса скаливания, а также на разработку мероприятий, снижающих скорость такого износа. Бессспорно, в период работы марганцевых печей без кислорода и с относительно низкими тепловыми нагрузками скаливание было доминирующим видом износа основных сводов. Однако, ряд практических данных и результаты отдельных исследований позволяют предполагать, что по мере интенсификации плавки все большую роль начинает играть процесс оплавления сводовых оgneупоров. Этот процесс изучен слабо и сама возможность значительного износа сводов марганцевых и двухванных печей путем оплавления является в настоящее время предметом дискуссии.

Отсутствие необходимой полноты и противоречивость существующих данных о влиянии эксплуатационных факторов на износ сводовых оgneупоров во многом объясняется ограниченными возможностями используемых методов исследования (в частности, наиболее часто применяемых статистических методов). Надежная количественная оценка влияния режимных факторов на стойкость свода, достаточно точное прогнозирование на этой основе момента остановки печи на ремонт, а также выбор рациональной по условиям стойкости степени интенсификации процесса требуют разработки оперативных методов контроля скорости износа свода по ходу кампании печи. В настоящее время такие методы отсутствуют.

На ряде заводов определяют только среднюю скорость износа свода за межремонтный период по измерениям его остаточной толщины на промежуточных и холодных ремонтах. На работающей печи степень износа кладки свода весьма приближенно можно определить по ряду косвенных признаков, которые, как правило, мало надежны. Известные способы измерения остаточной толщины свода на действующих марганцевых печах оказались мало пригодными для повседневной практики и не получили замечного распространения.

## П. НОВЫЙ ДАТЧИК - ТЕРМОУКАЗАТЕЛЬ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ КЛАДКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

### Метод измерения

Предложен новый метод контроля толщины кладки, основанный на измерении температуры нагрева воды, протекающей у внешнего кожуха Фурмы, расположенной в кладке и выступающей в рабочее пространство печи. Тепловой поток на поверхность фурмы, выступающую в печь, при температурах сталеплавильных процессов во много раз больше, чем тепловой поток внутри кладки. Поэтому скорость нагрева воды после прохождения сечения, соответствующего границе кладки, резко возрастает. На кривой нагрева обнаруживается характерный излом, положение которого указывает толщину кладки.

Точность предложенного метода измерения определяется тем, насколько резко меняется тепловой поток, а следовательно, и скорость нагрева воды при переходе из зоны кладки в зону рабочего пространства. Этот вопрос исследован на математической модели, с помощью которой определили изменения интенсивности теплового потока по длине фурмы в зоне кладки. Двумерное температурное поле в кладке толщиной  $S$  вблизи фурмы при постоянном коэффициенте теплопроводности огнеупора  $\lambda$  определяется уравнением

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} = 0 \quad (2)$$

при граничных условиях (третьего рода)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(0,R)}{\partial X} &= \frac{d_B}{\lambda} [T(0,R) - T_B]; & - \frac{\partial T(S,R)}{\partial X} &= \frac{d_n}{\lambda} [T_n - T(S,R)] \\ \frac{\partial T(X,0)}{\partial R} &= \frac{d_\Phi}{\lambda} [T(X,0) - T_\Phi]; & \frac{\partial T(X,\infty)}{\partial R} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь  $X$  и  $R$  - цилиндрические координаты относительно оси фурмы;  $T_B = 50^\circ\text{C}$ ;  $T_n = 1700^\circ\text{C}$ ;  $T_\Phi = 30^\circ\text{C}$  - температуры окружающей среды (воздуха), рабочего пространства печи и поверхности фурмы;

$d_B$ ,  $d_n$  и  $d_\Phi$  - соответствующие постоянные коэффициенты теплоотдачи от кладки к наружному воздуху (конвекцией), на поверхность кладки со стороны рабочего пространства (излучением) и на поверхность фурмы в кладке (теплопроводностью).

Задача решена численно конечно-разностным методом (методом сеток). Ось  $X$  систочной области в кладке индексируется по  $i$ , радиус  $R$  - по  $j$ . При использовании обычного пятиточечного шаблона получили следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\delta T}{\delta R} \right)_{i,j} &= \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2 \Delta R} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta R} - \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta R} \right) \\ \left( \frac{\delta^2 T}{\delta R^2} \right)_{i,j} &= \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j}) - (T_{i,j} - T_{i,j-1})}{\Delta R^2} \\ \left( \frac{\delta^2 T}{\delta X^2} \right)_{i,j} &= \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) - (T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\Delta X^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\Delta R = h_x$$

$$\Delta X = h_x - \text{параметры сетки}$$

Подставив (4) в (2), получили

$$T_{i,j} = \frac{h_x^2 (T_{i+1,j} - T_{i-1,j}) + h_x^2 \left[ (1 + \frac{h_x}{2R_i}) T_{i,j+1} + (1 - \frac{h_x}{2R_i}) T_{i,j-1} \right]}{2(h_x^2 + h_z^2)} \quad (5)$$

Таким образом, из дифференциального уравнения теплообмена (2) следует сеточное уравнение (5).

Границные условия (3) в конечно-разностном виде сводятся к соотношениям:

$$T_{\text{пов},j} = \frac{T_{i,j} + M_B T_B}{1 + M_B}; \quad M_B = \frac{d_B h_x}{2\lambda} \quad (6)$$

$$T'_{\text{пов},j} = \frac{T_{n+1,j} + M_n T_n}{1 + M_n}; \quad M_n = \frac{d_n h_x}{2\lambda} \quad (7)$$

$$T_{\text{пов},0} = \frac{T_{0,j} + M_\Phi T_\Phi}{1 + M_\Phi}; \quad M_\Phi = \frac{d_\Phi h_z}{2\lambda} \quad (8)$$

$$T_{\text{пов},m} = T_{i,m} \quad (9)$$

Для решения данной задачи был использован итерационный метод – процесс Либмана. Расчет выполнен на ЭВМ "Наира". Он показал, что зона воздействия фурмы на температурное поле обнаруживается на расстоянии  $R < 250$  мм, причем вблизи рабочей поверхности кладки это воздействие практически заканчивается на расстоянии  $R \approx 50$  мм.

Полученная численным методом кривая изменения интенсивности теплового потока на поверхность фурмы от кладки  $Q_x$  хорошо аппроксимируются полиномом

$$Q_x = 25 \cdot 10^3 + 60 \cdot 10^3 x + 590 \cdot 10^3 x^2, \text{ ккал/м}^2. \quad (10)$$

При этом увеличение температуры воды в фурме в зоне кладки  $\Delta t$  следует выражениям

$$\Delta t = \frac{1}{cG} \int_0^s Q(x) dx \quad (II)$$

$$\Delta t = \frac{\pi d_\Phi}{cG} (25 \cdot 10^3 x + 30 \cdot 10^3 x^2 + 196 \cdot 10^3 x^3), {}^\circ\text{C}, \quad (I2)$$

где  $c$  и  $G$  – теплоемкость и расход воды, а  $d_\Phi$  – диаметр фурмы.

На участке поверхности фурмы, выступающем в рабочее пространство, тепловой поток излучением рабочего пространства  $Q_n$  постоянен, а величина  $\Delta t$  определяется формулой

$$\Delta t = \frac{\pi d \varphi Q_n \ell}{c G}, {}^{\circ}\text{C}, \quad (13)$$

где  $\ell$  - расстояние от внутренней поверхности кладки.

Анализ расчетной кривой нагрева воды по длине фурмы (12, 13) показывает, что при переходе из зоны кладки в зону рабочего пространства вследствие резкого увеличения теплового потока скорость нагрева воды скачкообразно возрастает ~ в 10 раз. Таким образом, фиксируя кривую нагрева воды по длине фурмы, можно по положению точки излома кривой с достаточно высокой точностью судить о положении границы внутренней поверхности кладки. Точность измерения толщины кладки предложенным методом определяется точностью, с которой фиксируются координаты температурной кривой нагрева воды, и неравномерностью износа фугеровки по периметру фурмы. От расхода и начальной температуры воды, а также от температуры рабочего пространства положение точки излома кривой, а следовательно, и точность измерения толщины фугеровки не зависит. Изменение расхода воды, как и температуры рабочего пространства печи, приводят лишь к изменению углов наклона участков температурной кривой, а изменение начальной температуры воды ~ к смещению всей температурной кривой на диаграмме вторичного прибора. Это является одним из существенных преимуществ предложенного метода измерения. Расчеты также показали, что отводом тепла вдоль стенки фурмы можно пренебречь.

#### Конструкция датчиков

Разработаны два варианта конструкции термоуказателя толщины кладки для установки в сводах марганцевых и двухванных печей. В первом варианте для измерения температуры воды по длине фурмы использована батарея датчиков (термометров сопротивления), установленных стационарно вдоль наружного кожуха фурмы на равных расстояниях друг от друга. Место излома на кривой нагрева воды при определенном положении фурмы в начале кампании и известном расстоянии между катушками термометров сопротивления указывает толщину свода в каждый данный момент. По мере износа свода точка излома кривой нагрева воды на диаграмме вторичного прибора смещается в сторону катушек, расположенных на все более высоких уровнях. Таким образом, толщина свода, а следовательно и скорость его из-

носа, контролируются практически непрерывно по ходу кампании печи.

Во втором варианте измерение температуры воды по длине фурмы осуществляется с помощью подвижного чувствительного элемента. Координаты точки излома на температурной кривой, а следовательно, и толщина кладки определяются при равномерном возвратно-поступательном перемещении датчика температуры по длине фурмы.

Точность измерения остаточной толщины кладки термоуказателями в промышленных условиях при их установке на маргеновских печах ЧМЗ и ЧерМЗ определяли сопоставлением показаний датчиков на последних плавках перед остановкой печей на ремонт с контрольными замерами толщины свода, выполненными во время ремонта механическим способом (с помощью щупов). Установлено, что погрешность измерения не превышает 10 мм. Такая точность вполне достаточно для практических целей. Следует отметить, что благодаря небольшим размерам фурмы датчика (наружный диаметр 45 мм) при разработанном способе заделки её в свод датчик не оказывает заметного влияния на износ свода в месте установки. Практика показала, что разработанные датчики обладают удовлетворительными эксплуатационными характеристиками.

#### Выбор места установки датчиков

Для решения вопроса о выборе места установки датчиков изучался характер износа сводов маргеновских и двухванной печей ЧМЗ и ЧерМЗ. Были статистически обработаны топографии износа сводов 114 кампаний маргеновских печей ЧМЗ, 156 кампаний маргеновских печей ЧерМЗ и 39 кампаний двухванной печи ЧерМЗ за период с 1967 по 1971 гг. Определены законы распределения следующих величин, характеризующих износ: остаточной толщины свода в каждой точке измерения, средней остаточной толщины по поверхности свода и, наконец, частоты случаев максимального износа в данной точке (т.е. относительного числа кампаний, на которых в данной точке наблюдался максимальный износ).

Распределение значений остаточной толщины во всех точках измерения оказалось достаточно близким к нормальному и характеризуется небольшой положительной асимметрией. В среднем износ сводов в существующих условиях относительно равномерен; наибольшая неравномерность наблюдается на двухванной печи. Сильнее всего своды изнашиваются по центральной линии; центр свода характеризуется наименьшим средним значением остаточной толщины. Во всех случаях центр свода является также и наиболее вероятным для каждой кампании местом максимального износа.

Таким образом, в существующих условиях для решения практических задач контроля износа сводов по ходу кампаний достаточно устанавливать на печи один термоуказатель толщины кладки вблизи центра свода. На двухванной печи необходимо устанавливать по одному датчику на каждую ванну. При использовании предложенного метода в научных целях число датчиков должно определяться конкретными задачами исследований.

### III. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА И ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗНОСА СВОДОВ МАРТЕНОВСКИХ И ДВУХВАННЫХ ПЕЧЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОУКАЗАТЕЛЕЙ

В 1968-1972 гг. термоуказатель толщины кладки прошел длительные промышленные испытания на 100-т и 220-т марганцовских печах ЧМЗ; а также на 600-т и двухванной печах ЧерМЗ. Все печи отапливаются природным газом и работают скрап-рудным процессом с применением кислорода. Термоуказатели устанавливали вблизи центра свода по одному на печь (на двухванной печи - по одному на каждую ванну). Измерения остаточной толщины свода сопровождались регулярным (обычно ежедневным) фотографированием его внутренней поверхности. Таким образом, все изменения показаний термоуказателя сопоставлялись с видимыми изменениями состояния внутренней поверхности кладки, что позволило с большей надежностью судить о точности измерений остаточной толщины свода и о самом характере износа кладки. Всего было получено более 20 кривых износа свода по ходу кампаний исследуемых печей. Непрерывный контроль толщины свода с помощью термоуказателей позволил, по-существу, впервые выявить некоторые важные особенности износа сводовых оgneупоров.

Анализ полученных кривых износа сводов показал, что износ свода проходит весьма неравномерно, особенно на 100-т печах, отличающихся высокой стойкостью (до 600 плавок). На этих печах наряду с интенсивным износом наблюдаются периоды работы печей при практической постоянной толщине свода, причем длительность таких периодов может достигать 50 и более плавок. Сопоставление изменений скорости износа свода по ходу кампаний с изменениями режимных параметров показывает, что значительное ускорение износа, как правило, связано с какими-то неблагоприятными изменениями режима работы печи. Во многих случаях эти изменения удалось установить и выразить количественно. В зависимости от изменений режимных факторов скорость износа свода по ходу одной и той же кампании может изменяться в 2-3 раза. Все это подтверждает представление о доми-

нирующем влиянии на износ сводов эксплуатационных фагоров и вместе с тем свидетельствует о больших потенциальных возможностях увеличения стойкости печей за счет совершенствования методов и режимов управления плавкой.

Регулярное фотографирование внутренней поверхности свода действующих печей показало, что наряду с промежуточными случаями можно выделить две весьма характерные картины износа свода - износ сколами и износ оплавлением, причем именно оплавление свода значительно усиливает износ. Сопоставление видимой картины износа свода с измерениями его скорости гермоиззагелями приводит к выводу, что оплавление может прогекать с вдвое - втрое большей скоростью, чем обычный износ сколами. Наиболее ярко выраженный характер износа свода оплавлением имеет место на двухванной печи, несмотря на то, что температуры поверхности свода на двухванных печах ниже, чем на маргеновских. Во многих случаях скорости износа свода сколами и оплавлением были близки по величине и оба эти вида износа наблюдались одновременно.

Влияние интенсивности продувки ванны кислородом на скорость износа свода изучалось на 600-т печи ЧЕМЗ и 220-т печах ЧМЗ. Продолжительность продувки ванны на этих печах от плавки к плавке меняется весьма незначительно. Кроме того, исследуемые печи оборудованы системой автоматического регулирования теплового режима АВТЕР, которая поддерживает температуру свода на относительно постоянном уровне. Это позволило выделить и количественно оценить влияние на износ важнейшего режимного параметра продувки - её интенсивности. По ходу кампаний сопоставлялись скорость износа свода ( $\text{С, м/н}$ ) и средняя интенсивность продувки в период плавления ( $\text{J}_{\text{пл}, \text{м}^3/\text{ч}}$ ). Во всех случаях периоды ускоренного износа совпадали с периодами работы печей при повышенных значениях  $J_{\text{пл}}$ .

Полученные таким образом зависимости  $\text{С} (\text{мм/н})$  от  $J_{\text{пл}} (\text{м}^3/\text{ч})$  носят отчетливо выраженный "пороговый" характер (рис. I). Они приводят к выводу, что существует некоторая, достаточно узкая, область критических значений  $J_{\text{пл}}$ , зависящих от конкретных условий работы печи, превышение которых вызывает резкое ускорение износа. При значениях  $J_{\text{пл}}$ , не превышающих критического уровня, продувка ванны может не оказывать значительного влияния на стойкость свода.

Изучение влияния на стойкость свода числа продувочных фур показало, что стойкость свода определяется не столько общим расходом кислорода на продувку, сколько расходом кислорода на одну Фур-

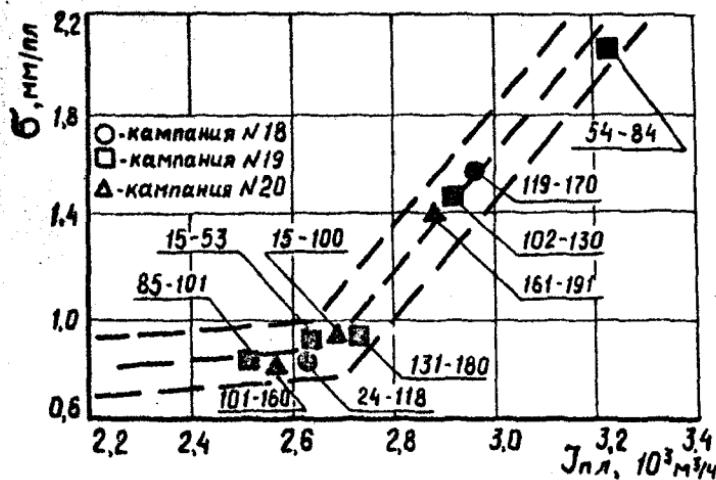


Рис.1. Зависимость скорости износа свода ( $G$ ) от интенсивности продувки ванны кислородом в период плавления ( $J_{\text{пл}}$ ) для 600-т печи. Цифры у точек – номера плавок, ограничивающих группы

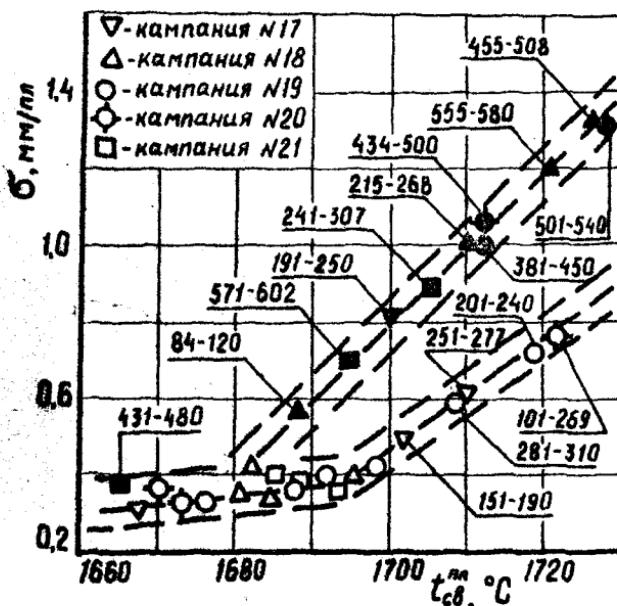


Рис.2. Зависимость скорости износа свода ( $G$ ) от температуры свода в плавление ( $t_{\text{ce}}$ ) для 100-т печи. Цифры у точек – номера плавок, ограничивающих группы. Темные точки – с продувкой ванны кислородом

му. Полученные результаты указывают на доминирующее влияние гидродинамических процессов продувки, определяющих разбрзгивание ванны. Известно, что интенсивность брызгообразования и высота подъема брызг зависят от расхода кислорода через Фурму. Критическим расходом является, по-видимому, такой расход, при превышении которого брызги металла и шлака во все возрастающих количествах достигают поверхности свода.

Влияние температурного режима рабочего пространства на стойкость свода изучалось на 100-т марганцовской печи ЧМЗ. Температура свода  $t_{cs}$  на этой печи контролируется с помощью шомпольского термозонда НИИМ и поддерживается системой АВТЕР на заданном по периодам плавки уровне с точностью  $\pm 15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ , как в периоды работы печи без продувки ванны, так и в условиях продувки. Это позволило дать надежную количественную оценку зависимости скорости износа свода от температурного режима печи. В качестве параметра, определяющего влияние температурного режима печи на износ кладки, приняли среднюю температуру свода за период плавления  $t_{cs}^{av}$ , так как именно в этот период создаются наиболее тяжелые условия службы кладки.

Исследования проводили на протяжении пяти кампаний, по ходу которых сопоставляли средние по отдельным отрезкам кампаний значения  $t_{cs}^{av}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и  $\bar{S}$  (мм/пл.). Установленная зависимость также несет пороговый характер (рис.2). При подаче кислорода только в факел изменение  $t_{cs}^{av}$  в пределах до  $1700^{\circ}\text{C}$  оказывает незначительное влияние на износ свода, однако превышение этого "критического" уровня (за счет увеличения тепловой нагрузки) сопровождается резким возрастанием скорости износа. В области значений  $t_{cs}^{av} > 1700^{\circ}\text{C}$  даже относительно небольшой рост температуры резко увеличивает  $\bar{S}$ .

При продувке ванны кислородом значение критической для стойкости оgneупоров температуры свода снижается до  $1680^{\circ}\text{C}$  (рис.2). Кроме того, в этом случае (при постоянстве  $J$ ) превышение критической температуры вызывает значительно большее ускорение износа. В области значений  $t_{cs}^{av} < 1680^{\circ}\text{C}$  скорость износа свода при подаче кислорода только в факел и при продувке ванны оказалась практически одинаковой.

Полученные данные приводят к выводу, что применение гермоукладателя толщины кладки делает возможным оперативное управление основными режимными факторами  $J$  и  $t_{cs}$ , обеспечивающее остановку печи на ремонт строго по графику с заданной минимально необходимой остаточной толщиной свода. Такое управление износом может значительно улучшить показатели работы марганцовских печей и цехов.

#### IV. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА НА ИЗМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ СВОДОВЫХ МАГНЕЗИТО-ХРОМИТОВЫХ ОГНЕУПОРОВ

##### Методика исследования

Скорость износа сводовых огнеупоров в значительной мере определяется изменением их свойств в процессе службы. Исследование этих изменений в зависимости от степени интенсификации процесса необходимо для полного понимания механизма разрушения сводовых огнеупоров на современных сталеплавильных агрегатах, а также для уточнения предельно допустимых рабочих температур кладки и выбора наиболее эффективных способов повышения её стойкости в различных условиях эксплуатации.

В отличие от других работ образцы сводовых магнезитохромитовых огнеупоров отбирались на ряде печей, режимы интенсификации которых охватывают весь диапазон условий, встречающихся в современной практике:

| Заводы | Печи                      | Емкость, т | Интенсивность продувки, м <sup>3</sup> /ч | Марка кирпича |
|--------|---------------------------|------------|---|---------------|
| ЧТПЗ   | № 3                       | 125        | -   | МХС           |
| ЧМЗ    | № 8                       | 220        | 1200                                      | МХС           |
| ЧерМЗ  | № 5                       | 600        | 2500                                      | МХС           |
| ЧерМЗ  | № 8                       | 600        | 2500                                      | ПМС           |
| НТМК   | № 16                      | 400        | 2500                                      | МХС           |
| ЧерМЗ  | № 12<br>двуихвани-<br>ная | 300x2      | 9000                                      | МХС           |

Все печи (расположенные в порядке увеличения степени интенсификации процесса) отапливаются природным газом и мазутом. Мартеновская печь № 3 Челябинского губопрокатного завода (ЧТПЗ) работает на твердой завалке без применения кислорода. Печи ЧМЗ, ЧерМЗ и Нижне-Тагильского металлургического комбината (НТМК) работают с подачей кислорода в факел и ванну при умеренной интенсивности продувки. На двухванной печи № 12 ЧерМЗ применяется продувка ванны с предельно высокой интенсивностью.

Во всех случаях для исследований отбирались образцы кирпичей, служивших в центре свода. При этом обращали внимание на завершенность процессов минералообразования в рабочей зоне и отсутствие

свежих сколов на рабочей поверхности. При исследовании образцов не ограничивались изучением минерального и химического составов трех основных зон (рабочей, переходной и малоизмененной), формирующихся в процессе службы и имеющих значительную протяженность. Скорость износа свода оплавлением зависит от изменения свойств огнеупоров в более тонких слоях, непосредственно примыкающих к рабочей поверхности кирпича. Поэтому из исследуемых образцов параллельно рабочей поверхности тонким алмазным кругом вырезались последовательные слои толщиной 2-3мм. Изучали минеральный и химический состав слоев. Кроме того, по нескольким прооам из каждого слоя определяли температуру начала плавления материала.

Изучались также свойства наносного слоя реагентов на рабочей поверхности сводов. Этот жидкотекущий слой образуется при попадании на свод частиц шлака, металла и плавильной пыли. Взаимодействием наносного слоя со сводовыми огнеупорами и объясняются в конечном итоге все изменения их состава и свойств в процессе службы.

Температуру начала плавления огнеупоров и наносного слоя определяли в специальной микропечи с защитной атмосферой, предохраняющей электроды печи и образец от окисления. Установка была герметизирована по точкам плавления чистых кристаллических веществ с известной температурой плавления - сульфата бария  $BaSO_4$  (температура плавления  $1580^{\circ}C$ ) и корунда  $Al_2O_3$  (температура плавления  $2050^{\circ}C$ ). Среднеквадратичное отклонение действительной температуры начала плавления образцов огнеупоров не превышает  $20^{\circ}C$ . По своей физической сущности температура начала плавления, определяемая в микропечи с помощью разработанной методики, близка к показателю огнеупорности. Она достаточно хорошо характеризует ту предельную температуру, при достижении которой должно значительно ускоряться разрушение огнеупоров путем оплавления.

#### Изучение наносного слоя

Исследования проводились на 220-т печи ЧМЗ и двухкамерной печи ЧерМЗ. В отличие от других работ осуществлялся непосредственный отбор проб слоя по ходу плавки с помощью неохлаждаемого металлического крюка через специальные отверстия, оставленные в кладке свода вблизи его центра. Одновременно фиксировалась температура свода и интенсивность продувки. Для всех проб определялся химический состав и температура начала плавления. Отбор проб с внутренней поверхности свода производился в различные периоды плавки.

Было установлено, что в первые периоды плавки от заправки до заливки чугуна, несмотря на достаточно высокую температуру свода (до  $1600\text{--}1650^{\circ}\text{C}$ ), его рабочая поверхность находится в твердом состоянии, что не позволило отобрать пробы какого-либо материала с этой поверхности. После заливки чугуна при продувке ванны кислородом, несмотря на снижение температуры свода во время заливки до  $1500^{\circ}\text{C}$  и ниже, отбор проб не вызывал затруднений. Металлический крюк не имел никаких режущих кромок, но с его помощью легко и в достаточно больших количествах снимался наносный слой, постоянно присутствующий на поверхности сводового кирпича. Полученные пробы обычно принимали окружную форму и имели оплавленный вид, что указывало на отбор материала, находящегося в жидкотекучем состоянии.

Результаты химического анализа проб наносного слоя и измерений температуры начала плавления материала этих проб показывают, что при продувке ванны марганцевых и двухванных печей внутренняя поверхность свода покрыта легкоплавким расплавом, состав которого довольно близок к составу марганцовского шлака и отличается в основном повышенным содержанием  $MgO$  и  $Ca_2O_3$ , что указывает на интенсивное взаимодействие реагентов наносного слоя с материалом рабочей зоны сводового огнеупора. Существенной разницы по составу и температуре начала плавления наносного слоя на марганцовской и двухвальной печи при продувке ванны не обнаруживается.

На двухвальной печи продувка ванны кислородом прекращается лишь перед самым выпуском плавки. Поэтому на протяжении периодов плавления и доводки рабочая поверхность сводовых огнеупоров постоянно покрыта слоем легкоплавкого расплава с температурой начала плавления  $1300\text{--}1370^{\circ}\text{C}$ . На марганцовской печи пробы наносного слоя отбирались не только во время продувки, но и в конце периода доводки через 15–20 мин после окончания продувки. Анализ этих проб показал, что по окончании продувки, когда интенсивное забрызгивание свода шлаком и металлом прекращается, легкоплавкий расплав стекает с поверхности свода и остатки наносного слоя представляют собой более тугоплавкий материал. Отбор проб в данном случае был затруднен несмотря на высокую температуру свода (около  $1700^{\circ}\text{C}$ ). Слой снимался небольшими порциями, пробы имели рыхлое строение и были оплавлены лишь частично. Химический состав и температура начала плавления этих проб оказались близкими к соответствующим значениям для поверхностного слоя кирпича.

## Изучение образцов огработавших сводовых огнеупоров

Петрографический послойный анализ отобранных образцов показал, что минеральный состав по слоям и зонам существенно зависит от степени интенсификации процесса. Переходная и, в особенности, рабочая зоны огнеупора претерпевают тем более глубокие изменения, чем выше интенсивность продувки ванны кислородом. При увеличении расхода кислорода на продувку содержание первичных высокоогнеупорных минералов в рабочей зоне (в % объемн.) закономерно уменьшается, а содержание более легкоплавких вторичных шпинелидов и реакционного феррошинелида увеличивается.

|               | М.п. № 3 | М.п. № 8 | М.п. № 5 | М.п. № 8 | М.п. № 16 | Дв.п. № 12 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|
|               | ЧПЗ      | ЧМЗ      | ЧерМЗ    | ЧерМЗ    | НТМК      | ЧерМЗ      |
| Периклаз      | 45-50    | 35-40    | 30-35    | 47-50    | 13-18     | 15-17      |
| Феррошинелиды | 18-22    | 25-30    | 30-35    | 35-40    | 55-60     | 65-70      |

Еще более четко эта зависимость проявилась при подробном петрографическом исследовании отдельных слоев рабочей зоны, расположенных вблизи внутренней поверхности кирпича. В этих слоях с повышением степени интенсификации процесса содержание высокоогнеупорных минералов уменьшается во много раз.

Химический анализ исследуемых огнеупоров показал, что для всех образцов характерным является закономерное повышение содержания окислов железа и уменьшение содержания  $MgO$  в направлении к внутренней рабочей поверхности (табл. I). Максимальное содержание  $CaO$  и  $SiO_2$  наблюдается на некотором расстоянии (15-30 мм) от рабочей поверхности. Содержание  $Ca_2O_3$  по высоте образцов существенно не меняется. Содержание окислов железа в огнеупорах повышается по мере увеличения степени интенсификации процесса. Вблизи рабочей поверхности магнезитохромитового кирпича после службы в своде бескислородной печи № 3 ЧПЗ содержится около 25%  $Fe_2O_3$ , а на расстоянии 10 мм - ~ 8%. На двухванной печи эти величины достигают соответственно 60% и 19% (табл. I). Максимальная глубина миграции окислов железа, привнесенных из наносного слоя, также зависит от интенсивности продувки и меняется в довольно широких пределах от 15 до 25 мм. Соответственно условия эксплуатации влияют и на характер изменения содержания  $MgO$  по высоте сводовых огнеупоров. С повышением степени интенсификации процесса содержание  $MgO$  в поверхностных слоях резко падает (табл. I). На печах, работающих с

Таблица I.

Изменение химического состава и температуры начала плавления по высоте отслуживших сводовых огнеупоров

| Нечи                | Расстояние от рабочей поверхности, мм | Содержание, % вес              |                                |                  |     |      | Температура начала плавления, °C |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|------|----------------------------------|
|                     |                                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO | MgO  |                                  |
| ЧПЗ № 3,<br>МХС     | 0-5                                   | 49,9                           | 12,1                           | 4,4              | 3,3 | 24,6 | 1717                             |
|                     | 7-9                                   | 63,2                           | 14,0                           | 4,8              | 3,3 | 9,3  | 1837                             |
|                     | 12-13                                 | 62,5                           | 14,0                           | 5,7              | 3,3 | 7,7  | 2114                             |
|                     | 18-22                                 | 60,7                           | 14,0                           | 7,0              | 5,1 | 7,4  | >2200                            |
|                     | 35-40                                 | 62,0                           | 11,4                           | 7,4              | 5,7 | 9,0  | >2200                            |
| ЧПЗ № 8,<br>МХС     | 0-3                                   | 52,0                           | 7,4                            | 4,2              | 4,6 | 29,5 | 1667                             |
|                     | 6-8                                   | 59,1                           | 8,7                            | 7,7              | 7,3 | 14,1 | 1810                             |
|                     | 15-18                                 | 65,4                           | 8,8                            | 8,8              | 8,5 | 7,7  | 2170                             |
|                     | 22-26                                 | 75,0                           | 6,8                            | 5,7              | 4,6 | 6,1  | >2200                            |
|                     | 35-40                                 | 78,9                           | 7,3                            | 4,1              | 3,1 | 5,8  | >2200                            |
| ЧПЗ № 5,<br>МХС     | 0-4                                   | 47,2                           | 11,1                           | 3,4              | 4,5 | 31,8 | 1662                             |
|                     | 6-9                                   | 56,8                           | 12,6                           | 4,5              | 5,2 | 16,6 | 1787                             |
|                     | 12-15                                 | 61,6                           | 12,8                           | 5,0              | 4,4 | 9,1  | 1995                             |
|                     | 20-23                                 | 61,0                           | 14,1                           | 8,3              | 6,0 | 9,0  | 2170                             |
|                     | 40-50                                 | 61,2                           | 12,3                           | 9,0              | 5,5 | 9,2  | >2200                            |
| ЧПЗ № 8,<br>МХС     | 0-5                                   | 36,7                           | 7,7                            | 2,8              | 3,9 | 47,7 | 1629                             |
|                     | 7-10                                  | 49,9                           | 10,7                           | 3,8              | 4,7 | 29,0 | 1685                             |
|                     | 12-15                                 | 54,6                           | 12,0                           | 4,6              | 4,3 | 19,4 | 1762                             |
|                     | 20-25                                 | 59,0                           | 13,8                           | 5,4              | 4,6 | 11,9 | 2090                             |
|                     | 28-30                                 | 58,4                           | 14,0                           | 6,3              | 5,2 | 9,5  | >2200                            |
| ЧПЗ № 12, п.<br>МХС | 0-3                                   | 27,2                           | 5,6                            | 3,1              | 4,8 | 59,2 | 1579                             |
|                     | 5-8                                   | 38,1                           | 5,3                            | 4,4              | 5,4 | 47,1 | 1631                             |
|                     | 9-12                                  | 59,7                           | 8,1                            | 7,9              | 6,3 | 18,5 | 1770                             |
|                     | 14-18                                 | 62,2                           | 9,2                            | 7,4              | 6,0 | 7,7  | 1970                             |
|                     | 22-26                                 | 65,3                           | 8,0                            | 7,3              | 6,0 | 5,6  | 2150                             |
|                     | 55-60                                 | 70,7                           | 5,2                            | 7,1              | 5,2 | 6,5  | >2200                            |

продувкой ванны, содержание  $\text{MgO}$  достигает значений, характерных для переходной и малоизмененной зон, лишь на расстоянии 15-20 мм от рабочей поверхности.

Изменение минерального и химического состава рабочей зоны приводит к изменению одной из важнейших характеристик огнеупоров - температуры начала плавления ( $t_{\text{н.пл}}$ ). Результаты измерений  $t_{\text{н.пл}}$  в отдельных слоях образцов показывают, что по мере приближения к рабочей поверхности кирпича температура начала плавления падает тем значительнее, чем выше степень интенсификации процесса (табл. I, рис. 3). Среднее значение  $t_{\text{н.пл}}$  поверхностного слоя сводового кирпича печи № 3 ЧТПЗ, работающей без кислорода, составляет  $\sim 1720^{\circ}\text{C}$ , а двухванной печи - только  $\sim 1580^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, при интенсивном применении кислорода огнеупорность рабочего слоя магнезитохромитовых сводовых изделий резко падает.

Следует отметить, что для интенсивно работающих печей характерен меньший градиент температур начала плавления по толщине рабочей зоны. Вследствие этого низкие значения  $t_{\text{н.пл}}$  простираются на большую глубину кирпича (рис. 3). Отметим, что ПМС-изделия по температуре начала плавления и изменению химического состава отдельных слоев не дают особых преимуществ в сравнении с МХС-изделиями (табл. I). Полученные данные показывают, что падение огнеупорности рабочего слоя кирпича в процессе службы определяется в основном снижением содержания  $\text{MgO}$ , вызванным насыщением огнеупора окислами железа. Соответствующие зависимости (рис. 4) отличаются малым разбросом точек и позволяют с достаточной степенью точности определять температуру начала плавления любого слоя кирпича по результатам химического анализа этого слоя на  $\text{MgO}$  или  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  независимо от особенностей работы агрегата и марки магнезитохромитового огнеупора (МХС и ПМС).

Падение температуры начала плавления рабочего слоя огнеупоров при повышении расхода кислорода на продувку объясняется усилением разбрзгивания ванны и увеличением интенсивности омыния свода металлом и шлаком, а следовательно, и скорости насыщения огнеупоров окислами железа. Между установленным в наших опытах снижением температуры  $t_{\text{н.пл}}$  и расходом кислорода на одну форму  $J$  наблюдается отчетливая корреляционная зависимость ( $r = 0,89$ ):

$$t_{\text{н.пл}} = 1700 - 0,044 J, {}^{\circ}\text{C}. \quad (14)$$

Она показывает, что в случае предельно высокой интенсивности продувки, достигающей на двухванной печи  $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$  на одну форму,

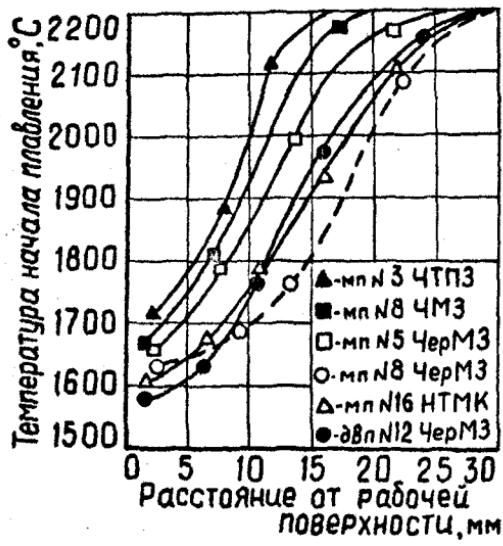


Рис. 3. Изменение величины температуры начала плавления по толщине кирпича для образцов основных сводовых огнеупоров после службы.  
 — МХС – изделия; - - - ПХС – изделия

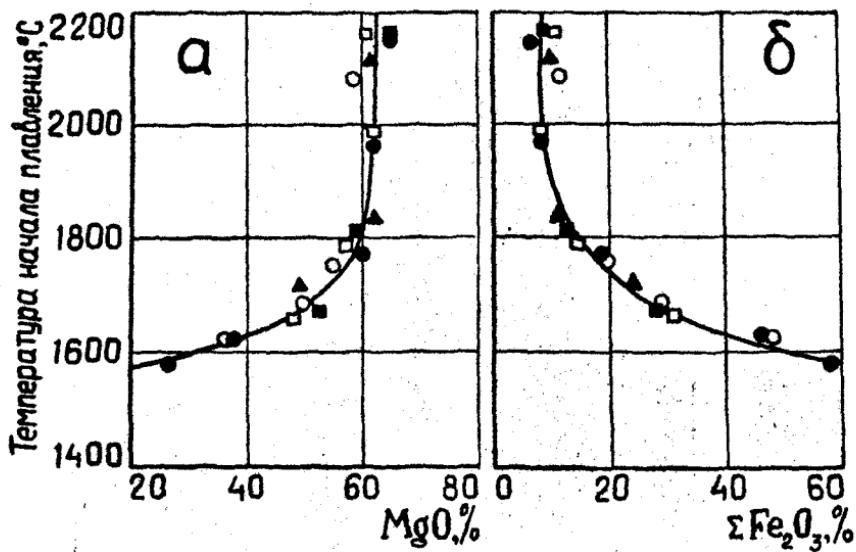


Рис. 4. Зависимость температуры начала плавления образцов от толстых магнезиохромитовых сводовых огнеупоров от химического состава. Обозначения те же, что и на рис. 3.

температура начала плавления поверхностного слоя сводовых огнеупоров по сравнению с бескислородным марганцовским процессом снижается примерно на  $130^{\circ}\text{C}$ . Возможность столь значительного падения огнеупорности рабочего слоя сводов современных печей, работающих с интенсивным применением кислорода, до настоящего времени не учитывалась, что в ряде случаев препятствовало разработке рациональных режимов эксплуатации и эффективных мер по повышению стойкости агрегатов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют с единой точки зрения объяснить противоречивую, на первый взгляд, картину изменений скорости износа сводов на различных стадиях интенсификации плавки в условиях ряда заводов. Полученные данные показывают, что основным процессом, ответственным за резкое падение стойкости печей при использовании кислорода, является оплавление сводовых огнеупоров. Скорость оплавления может значительно превышать обычную скорость износа сколами. Она определяется продолжительностью и величиной перегревов сводов над точкой начала плавления поверхностного слоя огнеупоров  $t_{\text{н.пл}}$ . Важнейшая для практики особенность процесса состоит в том, что величина  $t_{\text{н.пл}}$  значительно снижается по мере увеличения интенсивности продувки ванны кислородом, т.к. при этом увеличивается скорость насыщения сводовых огнеупоров окислами железа. Существенное превышение температур  $t_{\text{н.пл}}$  (на  $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ ) приводит к интенсивному оплавлению сводовых огнеупоров и снижает стойкость печей в полтора – два раза. В отсутствии подобных перегревов применение кислорода мало влияет на скорость износа.

Это подтверждается прямыми измерениями скорости износа с помощью термоуказателей толщины кладки конструкции НИИМ. Полученные при измерениях значения критических температур свода, превышение которых усиливало износ в указанных размерах, совпадают с соответствующими (по интенсивности продувки ванны) значениями  $t_{\text{н.пл}}$ .

К таким же выводам приводит анализ известных производственных данных. Во всех случаях, когда при фактически реализуемых температурных режимах печей соответствующие значения не достигаются, своды изнашиваются относительно медленно, преимущественно сколами, что обеспечивает примерно одинаковую и достаточно высокую стойкость – 400–600 плавок, независимо от интенсивности применения кислорода. Это относится к марганцовским печам малой и средней емкости ряда заводов, работающим без кислорода с температурами свода, как правило, не превышающими  $1720^{\circ}\text{C}$ ; к печам с умеренной

по интенсивности продувкой ванны, работающим с температурами свода не более  $1650\text{--}1680^{\circ}\text{C}$  (например, к печам цеха № 2 ЧМЗ), а также к двухванным печам ИМК, на которых, несмотря на предельно высокую интенсивность продувки ванны, температуры сводов обычно не превышают  $1600^{\circ}\text{C}$ . Разумеется, при таких сопоставлениях необходимо принимать во внимание не общую стойкость двухванных печей, а стойкость свода каждой ванны в отдельности, поскольку только эта стойкость, выраженная числом плавок каждой ванны, непосредственно связана с фактической скоростью износа огнеупоров.

Другую характерную и наиболее многочисленную группу образуют печи, работающие с применением кислорода при перегревах сводов над точкой  $t_{\text{пл}}$  на  $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ . На печах этой группы наблюдается примерно вдвое меньшая стойкость сводов, которая, независимо от других условий эксплуатации, не превышает 200–300 плавок. Это относится к печам как с умеренной, так и с высокой интенсивностью продувки ванны, в частности к двухванным печам ЧерМЗ, на которых, в отличие от двухванных печей ИМК, своды систематически перегреваются до  $1650\text{--}1700^{\circ}\text{C}$  за счет более полного дожигания окиси углерода в камере продувки.

Развитые в настоящей работе представления позволяют правильно прогнозировать эффективность известных и новых мероприятий по увеличению стойкости печей в различных условиях их применения. Увеличение высоты сводов оказывается полезным, главным образом, в той мере, в какой оно повышает температуру  $t_{\text{пл}}$  за счет уменьшения интенсивности омывания свода металло-шлаковым расплавом и насыщения огнеупоров окислами железа. Необходимо иметь в виду, что положительный эффект, достигнутый таким образом, может быть сведен к нулю последующим относительно небольшим увеличением температур свода или интенсивности продувки ванны.

Применение новых конструкций сводов, снижающих циклические нагрузки в кладке, является наиболее целесообразным в условиях, когда износ определяется преимущественно процессами скальвания. При интенсивном оплавлении сводовых огнеупоров подобные мероприятия не могут дать существенного эффекта. Это подтверждается результатами опробования сводов подобных конструкций на ряде заводов.

Во всех случаях и особенно в условиях дальнейшей интенсификации плавки для обеспечения высокой и стабильной стойкости марганцовских и двухванных печей необходимо исключить возможность значительного превышения установленных в настоящей работе предельно допустимых температур сводов.

Надежный контроль и автоматическое регулирование температурных режимов сводов могут быть обеспечены применением шомпольных термозондов и системы АВТЕР без снижения производительности печей.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод непрерывного измерения толщины кладки на сталеплавильных печах. Он основан на определении положения внутренней поверхности кладки относительно заделанной в нее водоохлаждаемой формы по характерному излому на кривой нагрева воды, прогекающей у внешнего кожуха формы. Особенности метода проанализированы с помощью математической модели.

2. Разработан новый датчик — термоуказатель толщины кладки, использующий предложенный метод измерения. Длительные промышленные испытания датчика в сводах марганцовских и двухваннных печей показали, что погрешность измерения толщины свода не превышает 10 мм. Термоуказатели рекомендуются для промышленного использования в марганцовских цехах.

3. С помощью термоуказателей проведены исследования износа сводов марганцовских печей сажкой от 100 до 600 г и двухванной печи. Установлено, что износ сводов протекает во времени весьма неравномерно. Ускорение износа, как правило, связано с неблагоприятными для стойкости кладки изменениями режима работы печей. Доминирующее влияние на скорость износа оказывают температурный режим рабочего пространства и режим продувки ванны кислородом. На печах, работающих с кислородом, наблюдаются два вида износа свода — сколовами и оплавлением, причем именно оплавление значительно увеличивает скорость износа. Наиболее интенсивное оплавление наблюдалось в двухванной печи ЧерМЗ.

4. Полученные зависимости скорости износа свода от температуры его поверхности  $t_{cs}$  и расхода кислорода на продувку  $J$  характеризуются наличием определенных критических значений  $t_{cs}$  и  $J$ , превышение которых резко увеличивает износ. При значениях  $t_{cs}$  и  $J$ , не превышающих критического уровня, продувка ванны не оказывает большого влияния на скорость износа огнеупоров.

5. Отбор проб наносного слоя с внутренней поверхности свода и их изучение показали, что при продувке ванны поверхность свода постоянно покрыта легкоплавким расплавом, который является продуктом взаимодействия брызг шлака и металла с рабочей зоной огнеупора. Продолжительность и интенсивность воздействия окислов наносного слоя на свод определяются режимом продувки и температурой свода.

6. Послойный петрографический и химический анализ образцов магнезитохромитовых огнеупоров, отобранных после службы в сводах различных печей, показал, что условия эксплуатации оказывают существенное влияние на изменение минерального и химического состава по высоте кирпича. Чем выше интенсивность продувки ванны, тем более глубокие химические и структурные превращения претерпевает рабочая зона огнеупоров вследствие все большего насыщения её окислами (главным образом окислами железа), привнесенными из наносного слоя.

7. При увеличении содержания в слое окислов железа (и соответствующем снижении содержания  $\text{MgO}$ ) температура начала плавления слоя  $t_{\text{н.пл}}$  резко падает. Между  $t_{\text{н.пл}}$  данного слоя и содержанием в нем окислов железа или  $\text{MgO}$  установлены отчетливые зависимости. Они могут служить для определения  $t_{\text{н.пл}}$  по результатам химического анализа слоя.

8. Установлена зависимость  $t_{\text{н.пл}}$  поверхностного слоя огнеупоров от интенсивности продувки. На двухваниной печи при предельно высокой интенсивности продувки ( $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$  на одну Фурму)  $t_{\text{н.пл}}$  падает до  $1580-1600^\circ\text{C}$ , что на  $120-150^\circ\text{C}$  ниже, чем на печах, работающих без кислорода. Полученные значения  $t_{\text{н.пл}}$  совпадают с соответствующими критическими температурами свода, установленными с помощью гермоуказателей.

9. При выборе рациональных режимов эксплуатации, обеспечивающих достаточно высокую стойкость сталеплавильных агрегатов, во избежание интенсивного оплавления сводов рекомендуется не допускать превышения температур начала плавления огнеупоров  $t_{\text{н.пл}}$ , являющихся предельно допустимыми. Установлены следующие значения этих температур: на печах без продувки ванны -  $1720-1700^\circ\text{C}$ , при продувке с умеренной интенсивностью ( $5-10 \text{ м}^3/\text{т.ч}$ ) -  $1680-1650^\circ\text{C}$ ; при высокой интенсивности продувки ( $20-30 \text{ м}^3/\text{т.ч}$  и более) -  $1600-1580^\circ\text{C}$ .

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Тулуевский Ю.Н., Устюгов А.А., Нечаев Е.А. "Непрерывный контроль износа сводов марганцевых печей". Бюлл. ЦИИНЧМ, 1971, № 2.

2. Тулуевский Ю.Н., Устюгов А.А., Савосгин Д.З., Шерстнев А.В. "Непрерывное измерение толщины свода марганцевых печей по ходу кампании". Огнеупоры, 1971, № 3.

3. Тулуевский Ю.Н., Устюгов А.А., Нечаев Е.А. "Исследование влияния эксплуатационных факторов на износ свода мартеновских печей". Сталь, 1972, № II.

4. Тулуевский Ю.Н., Устюгов А.А., Савостин Д.З. "Устройство для непрерывного замера толщины кладки металлургических печей". Авт.свид.СССР № 303528 (17.02.1969), Бюлл.1971, № 16.

5. Тулуевский Ю.Н., Устюгов А.А., Савостин Д.З. "Устройство для непрерывного замера толщины кладки металлургических печей". Авт.свид. СССР № 325472 (25.05.1970), Бюлл.1972, № 3.

Материалы диссертации доложены:

1. На семинаре НГО черной металлургии "Улучшение конструкции и стойкости оgneупорной кладки сталеплавильных агрегатов, нагревательных и термических печей, сталеразливочных ковшей и промежуточных устройств", Донецк, 1971.

2. На межобластном семинаре "Пути повышения стойкости сводов марганцевых и двухванных печей", Челябинск, НИИМ, 1971.

3. На Всесоюзной конференции молодых ученых - оgneупорщиков, Свердловск, ВОСТИО, 1973.

4. На VII Всесоюзном совещании оgneупорщиков, Свердловск, 1973.