

УДК 041:66.012.37

## О ПРОБЛЕМАХ КОНТРОЛЯ И СНИЖЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УГАРА СТАЛИ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

*Шульц Л.А., д.т.н., профессор кафедры «Энергоэффективные  
и ресурсосберегающие промышленные технологии» (shults@4polusa.ru)*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос оценки угара стали в промышленных печах по толщине окалины. Проанализированы возможности различных направлений снижения окисления стали. Особое внимание обращено на сопутствующие трудности снижения угара стали за счет уменьшения коэффициента расхода окислителя  $n$ . Показана реальность достижения практически безокислительного нагрева стали в промышленных печах в настоящее время. Выделены их важнейшие технологические характеристики: практически молекулярное смешение компонентов первичного горения (для природного газа при  $n = 0,48 - 0,5$ ); синхронность работы горелок и ограничение отклонения  $n$  при регулировании первичного сжигания топлива ( $\Delta n \leq 0,01$ ); эффективное струйно-механическое дросселирование первичного потока газов, исключающее обратное циркуляционное движение продуктов первичного неполного горения из зоны их дожигания в зону нагрева металла. Предложены направления конструирования и варианты работы кузнечных и прокатных печей с достижением соответствующих показателей по снижению или полному подавлению угара стали. Особо проанализированы вопросы внутреннего высокотемпературного окисления кремния трансформаторной стали и необезуглероживающего нагрева шарикоподшипниковой стали.

**Ключевые слова:** окалина, угар, сажа, обезуглероживание, печь,  $n$ , стадийное сжигание.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-470-478

Окисление металла является одной из основных характеристик работы прокатных и кузнечных печей. В среднем, например, при нагреве слябов (толщина 150 – 250 мм, время нагрева 2,5 – 3,5 ч) окисляется в прокатных печах около 1,5 % металла, при нагреве заготовок в кузнечных печах – 3,5 %. В отдельных случаях, например, при гомогенизирующем нагреве блюмов из стали ШХ15, окисление может достигать 6 – 8 % от веса нагреваемых заготовок. Как отмечал М.А. Глинков еще в 1936 г. [1], только 1 % потерь металла при его окислении экономически равноценен почти 100 % перерасхода топлива. Значительны и другие сопутствующие потерям металла при его нагревании экономические расходы, связанные с ухудшением качества поверхности обработанных давлением заготовок, ускоренным износом валков и штампов, расходами по гидросбиву окалины и др.

В работе [1] впервые отражены плюсы и минусы нагрева стали в «недостаточно восстановительной» (по отношению к железу) атмосфере. Важнейший из минусов такого нагрева – образование «злокачественной» вюститной насыщенной железом окалины, хотя она имеет и меньшую толщину, чем обычная, прочно сцепленной с металлом и плохо удаляемой с его поверхности перед обработкой давлением.

В 1936 г. в России природный газ практически еще не использовался. Основные виды топлива в то время – это твердое топливо, включая дрова, и генераторный газ. Печи на таком топливе к тому же отличались отно-

сительно несовершенными конструкцией и управлением. Очевидно, что разработка в таких условиях нагревательных печей с контролируемой восстановительной атмосферой существенно более сложной конструкции и более сложным управлением в то время была мало-перспективна. Поэтому, даже простая американская печь с двухслойным сжиганием, приведенная в работе [1], как бы она не работала в то время, была новаторством и знаковым направлением создания печей нового типа. Глинков М.А. видел в развитии печей с таким открытым режимом стадийного сжигания достаточно оснований, но при условии эффективного разделения газовых потоков, например, с использованием механического и струйного дросселирования в условиях организации их направленного движения. В то же время отмечено, что американская практика работы печей с «защитными» (с недостатком окислителя) горелками, факелы которых развивались непосредственно над поверхностью нагреваемых заготовок и вплотную к вышке и параллельно расположенным факелам основных горелок (с избыточным окислителем – воздухом), показала их очень низкую эффективность.

Конечно, в настоящее время с развитием технологий непрерывного литья заготовок, с ликвидацией крупных обжимных станов, с появлением технологий прямой отливки [2, 3], например тонкого листа непосредственно на двухвалковой машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и т.д., расход металла и энергии на прокат непрерывно снижается. Разработка и применение МНЛЗ,

обеспечивающих непосредственное получение из расплава готовой продукции, позволяет вообще отказаться от применения нагревательных печей в прокатных цехах. При этом достигается сокращение потерь металла на единицу продукции до 50 раз, т. е. во столько же раз, во сколько можно сократить угар стали при ее безокислительном нагреве. Однако, пока столь совершенных МНЛЗ очень мало (например, одна есть в Германии), причем некоторые стали, независимо от режима прокатки, должны подвергаться специальной тепловой обработке, в частности, высокотемпературной гомогенизации.

Особенности кинетики и термодинамики окисления рядовой стали весьма подробно и с достаточной для практики глубиной были изложены еще в работе [1] и более поздних исследованиях [4–6]. Остановимся в первую очередь на некоторых практических обобщениях по оценке угара стали и толщине образующейся окалины в печах.

При высокотемпературном нагреве стали в топливных печах, работающих в традиционных условиях с избытком окислителя (в России обычно воздуха при  $n = 1,1 - 1,3$ ) в итоге при нагреве рядовой стали образуется трехслойная окалина, состоящая при температуре выше 570 °С из вюстита, магнетита и гематита. Обычно FeO самый толстый слой в окалине – до 90 % ее толщины. Содержание железа в FeO около 76 % (со стороны контакта с Fe – 77,5 %), в магнетите – 75,5, наружном гематитовом слое – 71,5 %. В зависимости от скорости охлаждения окалины в вюстите выделяется то или иное количество кристаллов магнетита. В окалине, особенно на неровной поверхности, также наблюдается образование трещин, пор и пузырей.

Скорость окисления стали зависит от температуры, состава металла, состава газа и скорости его движения. Удельное количество сгоревшего металла (в %, кг/т) за одно и то же время, при одной и той же температуре также зависит от формы и размеров заготовок. Например, потери заготовок из рядового металла, имеющих форму брусьев размерами 40×60 мм и 100×100 мм при 1100 °С и равном времени окисления различаются более, чем в 2,0 раза [1]. Однако в практических условиях нагрева заготовок с увеличением их поверхности на единицу массы пропорционально повышается скорость нагрева и снижается время нахождения и окисления металла в печи. Практически угар металла в печах относительно мало зависит от размера заготовок, если металл нагревается только до достижения состояния его необходимой пластичности перед обработкой давлением. Остановимся на влиянии формы заготовок, прежде всего их толщины, на связь угара металла с толщиной образующейся окалины, что важно при выработке способов оперативного контроля потерь металла в производстве.

С целью упрощения анализа влияния размеров вначале рассмотрим результаты равномерного окисления плоской заготовки, условно сляба без боковых по-

верхностей. Один процент потерь массы таких стальных заготовок толщиной 100 мм соответствует 0,5 мм переведенного в окалину приповерхностного слоя металла, или удельным потерям металла на единицу площади поверхности заготовок 3,92 кг/м<sup>2</sup> (плотность стали 7,84 т/м<sup>3</sup>). Вес образовавшихся слоев окалины больше веса окисленного металла, в зависимости от типа оксидов, на 24–30 %. С учетом плотности образовавшихся соответствующих слоев окалины в пределах 5,70–5,24 г/см<sup>3</sup> (среднее значение плотности 5,45 г/см<sup>3</sup>) общая толщина плотной (не нарушенной) окалины будет больше толщины окисленного металла на 90–110 %. Для аналогичных слябов (без учета их боковой поверхности) толщиной 150, 200 мм и т.д. 1 % потерь металла будет характеризоваться соответствующими большими удельными поверхностными потерями металла.

Для реальных слябов, например, ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК), имеющих размеры ребер 8–10, 0,90–1,85, 0,15–0,25 м, доля боковых поверхностей от общей их поверхности изменяется от 15,64 % (для небольших слябов) до 13,8 % (для наиболее крупных), вес сляба соответственно – от 8,46 до 36,26 т, общая удельная поверхность – от 2,02 до 1,18 м<sup>2</sup>/т, а толщина окисленного слоя металла при 1 % его потерь и равномерном со всех сторон окислении – от 0,635 до 1,08 мм, толщина окалины – от 1,21–1,33 до 2,05–2,27 мм. С увеличением или уменьшением потерь металла толщины окисленного металла и окалины пропорционально изменяются.

Приведенные расчетные данные, связывающие потери металла в печах при его окислении с толщиной окисленного слоя металла и образовавшейся окалины, к сожалению, по абсолютной величине являются весьма не представительными, даже для металла одной и той же марки, в том числе и при наличии лабораторных и расчетных данных. Проблематично использовать, например, в обратной задаче: по толщине окалины определить с необходимой точностью общие потери металла. Основные причины неточности таких расчетов связаны с неравномерностью разогрева и окисления разных участков заготовок, в частности слябов, например, ребер и их стыков, граней между заготовками, со стороны пода (особенно в томильной зоне), в местах контакта с опорами и направляющими, вблизи глиссажных труб, вблизи потоков горячих факельных и холодных подсосываемых газов, у амбразур горелок. Это происходит в связи с перекосами в настройке горелок по расходу газов и  $n$ , негерметичностью рабочего пространства, наличия в нем окон и т. д. Поэтому единственным одновременно достаточно точным и надежным методом определения влияния режимов нагрева, как и новых конструктивных изменений печи на общее окисление конкретных заготовок в конкретных печах до настоящего времени является весовой экспериментальный метод окисления тех же заготовок в тех же печах. Однако, как

показывает анализ, по частным показателям окисления, например по относительному изменению толщины окалины, к примеру, на наиболее доступной верхней грани слябов в отдельных «точках» (участках), можно достаточно точно определить относительное изменение потерь металла при его окислении после тех или иных изменений температурно-временных параметров печи, атмосферного режима, режима работы горелок и пр.

Изменение потерь металла от окисления стальных слябов, например, на 1 кг/т или 7,5 % от существующего среднего значения их угара (для ОАО «НЛМК» в прокатных печах) только в зависимости от размеров слябов в соответствии с представленными выше данными соответствует изменению общей толщины окалины при равномерном окислении заготовок со всех сторон от 0,09 – 0,10 до 0,15 – 0,17 мм. Естественно, изменение потерь металла при изменении режимно-атмосферных и других параметров нагрева в целом может быть оперативно (до применения в подобных случаях трудоемкой и обычно завершающей или контрольной операции: очистки от окалины заготовок и их взвешивания) оценено по относительному изменению толщины окалины в нескольких точках. Например, как уже отмечалось, в наиболее удобной для этих целей верхней горизонтальной поверхности слябов. Конечно, и в этом случае необходимы предварительные контрольные натурные измерения толщины окалины в тех же точках на конкретных заготовках после их нагрева на предшествующих режимах испытаний.

Существует достаточно много методов автоматического непрерывного и периодического контроля скорости окисления металла в лабораторных условиях, которые, к сожалению, непосредственно нельзя применить для промышленных заготовок с целью прямого контроля толщины образующейся окалины. Это оптические для тонких слоев (фотометрический, интерференционный, поляризационный), гравиметрические (крутильные, пружинные весы и пр.), электрометрические (по изменению силы тока при окислении проволочных образцов и ленты, их электросопротивления и пр.) методы. Наиболее точным, надежным и простым оперативным методом оценки относительного изменения окисления промышленных заготовок в тех или иных производственных условиях их нагревания, безусловно, может быть только метод, связанный с механическим «точечным» отделением (или удалением) окалины от подложки после нагрева и механическим измерением ее толщины или глубины образовавшейся на месте удаленной окалины впадины. При использовании штангельглубиномера (электронного, с часовым механизмом и пр.) в нескольких «точках» скола и удаления окалины сразу же после выхода нагретого металла из печи, потребуется не более 10 – 15 с, т. е. анализ может быть выполнен без нарушения ритма транспортирования заготовок, например, по рольгангу к стану.

Достичь снижения окисления металла, а равно и толщины образовавшейся окалины, например, на 10 – 15 % в нагревательных печах можно разными способами, в том числе следующими.

- *Уменьшением температуры нагрева заготовок (начальной температуры прокатки иликовки) на 50 – 100 °С.* В оценочных расчетах следует иметь в виду, что окислением стали в прокатных и кузнечных печах при температуре ниже 700 °С можно пренебречь. С 850 – 900 °С практически для всех низко- и среднелегированных сталей скорость окисления начинает резко возрастать. В первом приближении, если окисление при 900 °С принять за 1, то, например, (по В. Шредеру [1]) при 700 °С оно будет равно 0,1, при 950 °С – 1,25, при 1000 °С – 2, при 1100 °С – 3,5, при 1300 °С – 7 и т.д. Опираясь на эти значения, соответственно можно оценить окисление стали и при промежуточной температуре. Так, например, для нагрева перед прокаткой в печи с шагающими балками холодных слябов с их нахождением в томильной зоне при 1250 °С в течение 25 % общего времени нагрева заготовок снижение температуры нагрева до 1200 °С приведет к снижению угара металла в томильной зоне на 16 %, до 1150 °С – на 27 %, а также общему снижению окисления стали при сохранении производительности печи на 10 – 15 %. Точность аналогичной расчетной оценки влияния температуры нагрева массивных слябов, упирающихся в друг друга и кладку пода, на их угар для условий толкательной методической печи значительно снижается. Естественно, получить надежные данные по угару при снижении температуры нагрева металла в тех или иных условиях можно, только опираясь, как уже отмечалось выше, на данные промышленного эксперимента, в том числе упрощенного по анализу изменения толщины окалины в конце нагрева (в одних и тех же «точках», на заготовках одной и той же марки стали и одних и тех размеров).

- *Уменьшением времени высокотемпературной части нагрева примерно на 5 – 10 %.* Температурный режим нагрева стали в этом случае может быть выбран, например, с привлечением известных дифференциальных уравнений кинетики окисления металла Ю.Р. Эванса, К. Вагнера и опытных производственных данных, позволяющих уточнить обычно меняющиеся параметры окисления и значения эмпирических коэффициентов в уравнениях. К сожалению, точность теоретического расчетного метода и в подобных задачах недостаточна даже для грубой оценки угара металла в печи при изменении режима ее работы. По различным причинам временная зависимость окисления может меняться от квадратного корня до линейной. Много неопределенности и в изменении при этом температуры поверхности заготовок. Теплопроводность окалины примерно на порядок меньше теплопроводности стали, с другой стороны, при ее окислении выделяется значительное количество тепла. Стандартные энтальпии

образования оксидов окалины железа изменяются от 263,8 до 821,4 кДж/кмоль, значительно различается и оптическая плотность оксидов. В связи с этим температура образующейся окалины может отличаться от температуры металлической подложки до 50–75 °С. Естественно, что и в этом случае обоснованный окончательный вывод даже только об относительном изменении угара металла может следовать только после его экспериментальной проверки в производственных условиях, что может быть также связано в первую очередь с анализом толщины образующейся окалины. Известный практический результат этого направления снижения окисления стали был подтвержден на печах Стальпроекта – толкательной печи двухстадийного нагрева с промежуточным отбором газа и относительно низкотемпературным томлением заготовок, а также на прямоточно-противоточной нагревательной печи с шагающим подом [7].

• *Снижением коэффициента расхода воздуха  $n$  менее 1,0.* Это наиболее часто и давно применяемый производственный способ снижения окисления стали, но и он требует практической проверки и определенной доработки в части безопасности его применения, синхронизации (по  $n$ ) работы горелок, герметизации печи и предотвращения подсосов воздуха, введения надежного контроля окислительно-восстановительного потенциала продуктов сжигания топлива. Из-за относительно плохого смешения газов при использовании применяемых в настоящее время горелок (особенно «труба в трубе» и подобных им) и автоматических систем их регулирования, энергетических ограничений и выделения сажи снижение среднего коэффициента расхода воздуха ниже 0,8 сильно затруднено. Максимальное уменьшение окисления стали при таком снижении  $n$  может достигать 20 %. С переходом на работу печи с  $n \leq 1,0$  структура трехслойной окалины меняется на однослойную, состоящую в условиях высокотемпературного нагрева только из вюстита. В ней также могут быть поры, трещины и включения магнетита. Наиболее важно при этом повышение прочности сцепления оксидного слоя с металлом, что часто, как уже отмечалось, в свою очередь приводит к снижению качества металлопроката и повышению брака по вкатанной окалине. Во избежание образования такой «злокачественной» окалины в работе [1] рекомендуется следующий атмосферный режим в методической печи: до 950–1050 °С греть металл при избытке окислителя топлива, т. е. при коэффициенте расхода воздуха выше 1,0 (1,15–1,25), а при более высокой температуре (в сварочной и томильной зонах) – при  $n$  меньше 1,0. Предполагается, что окалина в этом случае получается легко отстающей, что, конечно, требует опытной производственной проверки и уточнения газового режима применительно к различным маркам стали. При этом баланс теплоты первичного сжигания и дожигания газов должен быть выбран таким образом, чтобы продукты недожога топлива высокотемператур-

ных зон были полностью использованы в методической низкотемпературной зоне, не перегревая ее. Уместно подчеркнуть, что одновременно такой двухступенчатый режим использования топлива приводит и к существенному (до 50 %) снижению образования оксидов азота. Проблема безопасности работы печи, вызванная возможной фильтрацией газов неполного сжигания через свод, выбиванием их через окна и щели решается вентиляцией околочечного пространства и использованием вентилируемого загрязненного воздуха в горелках на той же печи.

Отдельной и весьма серьезной проблемой высокотемпературного нагрева в печах является внутреннее окисление и обезуглероживание стали. Внутреннее окисление сплава происходит только в том случае, если свободная энергия образования оксида легирующего элемента имеет более отрицательное значение, чем оксида основного металла. Причем скорость диффузии кислорода в сплав превосходит скорость диффузии элемента к поверхности сплава. В сплавах железа такими легирующими, подверженными внутреннему окислению, являются Cr, Mn, Si, Al и др. Значительно влияние на глубину «видимой» зоны внутреннего окисления (ЗВО) скорости окисления базового элемента сплава – железа, зависящей как от состава атмосферы в печи, так и ее доступности к поверхности заготовки. Проведенные исследования окисления трансформаторной стали сульфидного и нитридного вариантов выплавки при температуре 1380–1400 °С в течение 1 ч на микрозонде «Камека» показали следующие результаты.

С горизонтальной открытой стороны:

- при  $n = 0,95 - 1,1$  ЗВО кремния и зона обеднения кремнием (ЗОК) отсутствуют;
- при  $n = 0,5 - 0,53$  ЗВО кремния 250 мкм, ЗОК 300 мкм.

Со стороны контакта с магнетитовой кладкой:

- при  $n = 0,95 - 1,1$  ЗВО кремния 650 мкм, ЗОК 300 мкм;
- при  $n = 0,5 - 0,53$  ЗВО кремния 300 мкм, ЗОК 350 мкм.

Коэффициенты диффузии кремния и кислорода при 1400 °С соответственно составляли  $0,5 \cdot 10^{-6}$  и  $10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с, содержание кремния в исходной стали – 2,9–3,2 %. Толщина окисленной стали на открытой поверхности достигала 4 мм. На поверхности образовывался расплав фаялита Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ( $t_{пл} = 1205$  °С). При  $n \approx 0,5$  окисление железа прекращалось, легкоплавкая часть окалины практически отсутствовала.

Промышленные испытания на ВИЗ листовой трансформаторной стали, полученной из слябов, нагретых при  $n \approx 0,5$  в печи Челябинского металлургического комбината (ЧМК), по сравнению с обычной продукцией показали значительное ухудшение ее электрических свойств – повышение ваттных потерь и слабую магнитную индукцию. Кратковременная (около 10 мин) высокотемпературная выдержка слябов перед



их выдачей из печи в продуктах горения при  $n \approx 1,2$  и температуре 1350 – 1400 °С с жидким шлакоудалением расплавленной части образовавшейся окалины приводила к полному удалению ЗВО и восстановлению электрических свойств листовой прокатанной стали. При этом, по сравнению с обычным нагревом в печи с непрерывным окислением и жидким шлакоудалением, угар металла снижался с 40 – 50 до 5 – 10 кг/т, т. е. в 5 – 8 раз [5, 8].

Анализируя результаты по высокотемпературному окислению трансформаторной стали, можно особенно наглядно убедиться в сложности механизмов окисления, не представительности и не адекватности возможных расчетных методов контроля окисления без их самой серьезной увязки с экспериментальными данными в конкретных условиях производства.

Естественно, самым эффективным и точным решением проблем высокотемпературного окисления сталей, включая различные расчетные и производственные проблемы, было бы создание прокатных и кузнечных печей действительно безокислительного («белого» по М.А. Глинкову) нагрева, в которых окисление Fe (по крайней мере) было бы невозможным. С учетом окисления заготовок на воздухе при их регламентированной транспортировке после выдачи из печи перед прокаткой или ковкой толщина образовавшихся оксидных пленок не превышала бы 30 – 50 мкм, что не сказывалось бы на качестве поверхности металлопродукции. При этом, как было подтверждено на практике работы соответствующих печей, например Ступинского металлургического комбината (СМК), отпадает и необходимость в какой-либо зачистке поверхности металла перед его прокаткой или штамповкой.

Накопленный за последние полвека материал по безокислительному нагреву стали в производственных условиях на базе специально построенных печей в настоящее время вполне достаточен для окончательного практического решения этого вопроса. Остановимся на наиболее заметных моментах, связанных с созданием и эксплуатацией первых опытно-производственных печей.

На специально построенной на ОАО «НЛМК» (1960 – 1965 гг.) опытной рекуперативной печи – стенде размером пода-тепломера 1,5×3,0 м были получены весьма важные сведения для печей безокислительного нагрева стали об образовании сажи и длине кислородной зоны факела. Опыты проводили на горелках с наиболее хорошим предварительным смешением газов – инъекционных ( $d_{н.г.} = 78$  мм). Оказалось, что даже при использовании таких горелок, работа печи при снижении  $n$  менее 0,60 – 0,65 резко осложняется из-за обильного выделения сажи. Затруднялись обслуживание, теплообмен, загрязнялась атмосфера цеха и комбината. Длина кислородной зоны факела неполного сжигания достигала в случае холодной смеси  $(12 - 15)d_{н.г.}$ , на подогретой смеси до  $800 K - (5 - 10)d_{н.г.}$ . Эти результаты были

учтены во всех в последующем построенных промышленных печах для безокислительного нагрева стали.

Впервые (1965 – 1970 гг.) и наиболее успешно работы по внедрению безокислительного нагрева стали в кузнечных камерных печах были проведены на СМК, позднее продолжены и на кольцевой печи Кулебакского металлургического завода с участием ГПИ «Гипроавиапром», ПО «Авиапромналадка». На СМК были построены три печи, каждую из которых эксплуатировали по несколько лет. В этих печах в безокислительном режиме, с соблюдением всех требований по качеству штампованных изделий для авиационного машиностроения, было нагрето более сотни тонн заготовок из стали ст. 45, 30ХГСА и др. На печах СМК впервые было установлено, что рассредоточенный низкоскоростной ввод первичных (восстановительных) газов и аэродинамическое разделение зон стадийного горения встречно направленными струями вторичного воздуха является надежной гарантией создания камерных и других печей с высокими технологическими и энергетическими показателями их работы. Все печи СМК работали без подогрева и обогащения воздуха кислородом. Весь газ с воздухом смешивали в циклоне, а практически молекулярно перемешанная таким образом смесь перед выходом в рабочее пространство печи воспламенялась в специальных предварительно разогретых каналах ее кладки, где и сгорала при  $n \geq 0,48$  без выделения сажи [9]. Коэффициент  $n = 0,48 - 0,49$  первичных продуктов сгорания с достаточной для практики точностью кузнецы контролировали оптически – визуально.

Значительный объем работ в те же годы по созданию относительно небольших печей безокислительного нагрева с преимущественно механическим разделением зон горения топлива был выполнен ВНИПИтеплопроектом [10]. Аналогичные печи разрабатывали и за рубежом. Наличие промежуточного свода, неизбежный при механическом разделении зон горения высокотемпературный подогрев воздуха (600 – 700 °С и выше) или значительное обогащение воздуха кислородом затрудняли создание и работу таких печей.

Первая относительно крупная проходная печь для «безокислительного нагрева» рядовой стали с открытым двухстадийным сжиганием топлива и ограниченным аэродинамическим разделением зон горения была построена в 1967 г. [9] с участием Днепропетровского металлургического института на базе реконструированной методической печи стана 550 Днепродзержинского металлургического завода (ДМЗ) с использованием коксового газа (КГ). Это была единственная печь такого типа на коксовом газе. Все подобные опытные промышленные печи отапливали природным газом (ПГ). К сожалению, КГ в то время на ДМЗ почти не подвергался очистке от серы и в нем содержалось до 5 – 15 г/м<sup>3</sup> сероводорода (современная норма 0,1 – 0,5 г/м<sup>3</sup>). При отоплении таким КГ по мере снижения  $n$  на металле уси-

ливалось образование сульфидов, которые практически замещали обычную окалину, также плохо удалялись гидросбивом и закатывались в металл. В последующем работы, связанные с переводом этой печи на ПГ и безокислительный нагрев, полностью не были завершены и печь в течение почти года эксплуатировали в режиме малоокислительного нагрева при  $n \approx 0,65 - 0,75$  со снижением угара стали в 1,5 – 2,0 раза по сравнению с обычным нагревом и увеличившимся поражением металлопроката вкатанной окалиной. Первичное же сжигание ПГ при меньших значениях  $n$  было невозможно из-за недостаточной пирометрии первичного горения, выделения сажи и неудовлетворительного распределения тепла по длине печи.

В разработке, строительстве и испытаниях (1970 – 1980 гг.) проходной высокотемпературной печи для нагрева слябов трансформаторной стали с регламентированным окислением приняли непосредственное участие такие известные организации, как ГПИ «Сталь-проект», ПТП «Уралэнергочермет», ВНИИМТ, ЦНИИЧЕРМЕТ, ЧЕЛЯБИПРОМЕЗ, ЧМК, ОАО «НЛМК», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» и Московский государственный вечерний металлургический институт. В построенной на ЧМК печи с зоной регламентированного окисления в конце нагрева (в ней стгорало только около 0,7 % металла вместо 4,5 % в обычной печи) было нагрето около 50 тыс. т трансформаторной стали. Первой по ходу слябов в этой печи была зона с аэродинамическим разделением струями вторичного воздуха восстановительных газов, поступающих из зоны гомогенизирующей диффузионной выдержки металла, и продуктов горения зоны дожига. Для предотвращения подсосов газов высокоскоростными горелками зоны диффузионной выдержки металла она была отделена от других зон поперечными балками с соответствующими зазорами над разогретыми слябами.

Проходная печь ЧМК (стан 2300/1700) была первой крупной эксплуатируемой промышленной печью с аэродинамическим разделением рабочего пространства. Она работала на предварительно подготовленной общей для всей печи смеси ПГ с холодным воздухом при  $n = 0,3$ , в которую через специальные горелки поступал кислород (поперечными струями со скоростью около 70 м/с). Схемы и теплотехнический анализ возможных показателей подобных проходных печей для безокислительного нагрева стали рассмотрены в работе [11].

К основным проблемам, решение которых гарантирует качество атмосферы в условиях высокотемпературного безокислительного (по Fe) нагрева стали в печах на природном газе можно отнести:

- первичное сжигание топлива при базовом  $n_6 = 0,48 - 0,50$ ;
- допустимое отклонение от  $n_6$  в зонах расположения металла в связи с несинхронностью работы горелок и подсосов воздуха  $\leq 0,005$ ;

- обеспечение качества регулирования базового  $n_6$  с перерегулированием  $\leq 0,01$ ;
- использование, наряду с визуальным методом контроля, автоматического оптического метода контроля базового  $n_6$ ;
- механическое и струйное дросселирование потоков, исключающее обратное циркуляционное перемещение газов из зоны дожига в зону нагрева металла;
- исключение опасности окисления металла кислородом первичного факела;
- молекулярное перемешивание газов первичного сжигания, исключающее выделение дисперсного углерода – сажи при  $n \geq 0,48$ ;
- нейтрализация опасности разгерметизации печей при загрузке и выгрузке металла.

Проблемы, возникающие при необезуглероживающем высокотемпературном нагреве углеродистых сталей, это все те же проблемы безокислительного нагрева, плюс проблемы достижения необходимой температуры, стабилизации углеродного потенциала, проблемы ацетилена, углерода – сажи и пироуглерода, образующихся при пиролизе метана в условиях формирования необходимой атмосферы. При температуре выше 600 °С изменение изобарно-изотермического потенциала (свободной энергии) образования оксида СО существенно более отрицательное, чем образования FeO, и с уменьшением окисления стали за счет снижения  $n \leq 1,0$  видимая глубина обезуглероженного приповерхностного слоя увеличивается [6, 12, 13]. При таком обычно наблюдаемом результате, естественно, скорость диффузии углерода к поверхности заготовок превышает скорость диффузии кислорода в металл.

На ЧМК был проведен опытный необезуглероживающий нагрев в существующей методической печи (стан 780) с муфелированием блюмов шарикопошипниковой стали, что также может быть надежным основанием для разработки и строительства соответствующих печей безокислительного необезуглероживающего нагрева углеродистых сталей с импульсным применением чистого (не конверсированного) или в смеси с азотом природного газа [5].

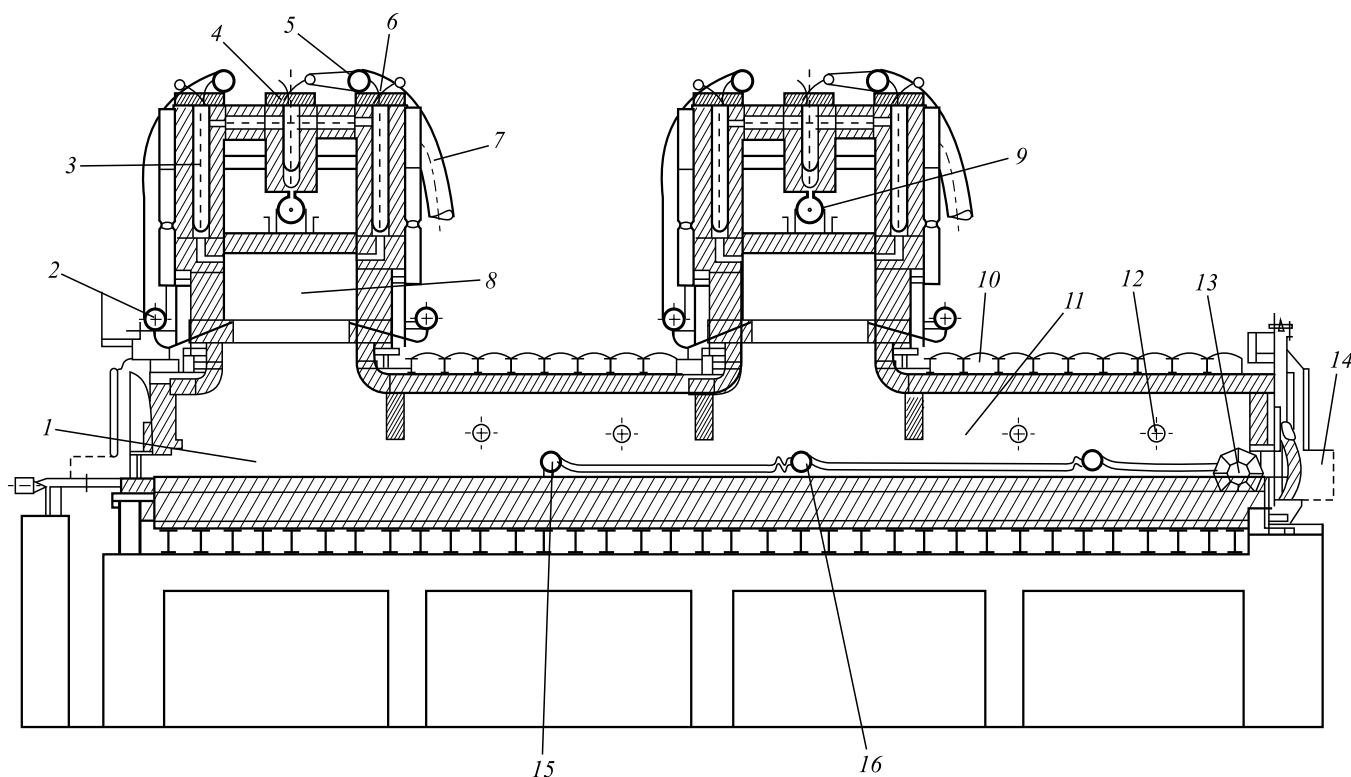
Термодинамический анализ [14] и промышленный нагрев блюмов подтверждают высокую технологическую и энергетическую эффективность высокотемпературного необезуглероживающего нагрева в безокислительной среде (по Fe) с применением муфелирования металла и импульсным вводом в муфель чистого или в смеси с азотом неконверсированного природного газа. При этом технологический расход природного газа, даже при длительном диффузионном отжиге стали, не превысит 1 – 3 % от его общего расхода в печи. Для реализации разработанной технологии высокотемпературного необезуглероживающего нагрева с целью достижения необходимой пластичности стали перед обработкой давлением наиболее пригодны толкатель-

ные проходные и камерные печи. Параметры ввода ПГ под муфель: объемная скорость ПГ  $\geq 0,03 \text{ с}^{-1}$ , пауза 100 – 300 с, время импульса 3 – 4 с. При этом никакой подготовки специальной «необезуглероживающей» атмосферы не требуется. Параметры ввода ПГ уточняются в зависимости от типа стали и результатов ее контрольного производственного нагрева.

Вариант проходной печи для безокислительного необезуглероживающего нагрева стали, основные элементы конструкции, отопления и управления которой были отработаны в производственных условиях, представлен на рисунке.

Количество зон дожигания газов (8) на представленной схеме с двухстадийным сжиганием топлива

определяется производительностью печи. На рисунке таких зон две. Со стороны стен печи муфель герметизируется песочным затвором (шамот, магнезит). Для крепления муфеля и ввода ПГ в печи устанавливаются балки. Поперечная водоохлаждаемая теплоизолированная балка (15) предназначена для крепления стеллюг, листового укрытия муфеля и подвески герметизирующих со стороны входа нагреваемого металла заслонок. Поперечная балка (16) с закрепленным на ней муфелем и теплоизолированным водоохлаждаемым трубопроводом с отверстиями (соплами) одновременно служит для импульсного ввода в муфель природного газа (или его смеси с азотом). Подобных теплоизолированных водоохлаждаемых балок-труб в печи устанавливается



Схематический разрез проходной толкательной рекуперативной печи для безокислительного необезуглероживающего нагрева стали перед пластической деформацией:

1 – открытый для безокислительного нагрева участок печи; 2 – трубопровод для подвода горячего вторичного воздуха к соплам аэродинамической завесы; 3 – петлевой металлический рекуператор со вставками для подогрева вторичного воздуха до 550 °С; 4 – петлевой металлический рекуператор для подогрева природного газа до 350 °С; 5 – сборный смесительный трубопровод первичного горячего воздуха и горячего природного газа; 6 – петлевой рекуператор со вставками для подогрева первичного воздуха до 550 – 580 °С; 7 – трубопровод для подвода горячей газовой смеси к горелкам; 8 – зона дожигания (вторая ступень сжигания) природного газа; 9 – трубопровод, соединенный с дымососом, для отвода продуктов горения из печи; 10 – герметизирующая сводовая крышка (одновременно клапан взрывной безопасности) на песочном затворе; 11 – участок печи для безокислительного необезуглероживающего нагрева с ковровым муфелем; 12 – амбразура горелки; 13 – окно для выдачи заготовок; 14 – шлюз-тамбур, герметизирующий окно выдачи и торцевое окно печи; 15 – головная поперечная водоохлаждаемая теплоизолированная балка; 16 – поперечная балка с трубопроводом для ввода ПГ

Schematic section of the pushing-through regenerative furnace for nonoxidative nondecarburization heating of steel before plastic deformation:

1 – furnace section open to nonoxidative heating; 2 – pipeline for supplying hot air to the secondary nozzles of aerodynamic curtain; 3 – loop metal heat exchanger with inserts for heating the secondary air to 550 °С; 4 – loop metal heat exchanger for heating the gas to 350 °С; 5 – mixing modular pipeline for the primary hot air and hot gas; 6 – loop heat exchanger with inserts for heating the primary air to 550 – 580 °С; 7 – pipeline for supplying hot gas mixture to the burners; 8 – afterburning zone of natural gas (the second stage of combustion); 9 – pipeline connected to exhaust fan for removing combustion products from the furnace; 10 – arched sealing cap (both explosive safety valve) on the sandy gate; 11 – furnace site for nonoxidative nondecarburization heating with carpeted muffle; 12 – burner loophole; 13 – window for issuance of blanks; 14 – gateway vestibule sealing the window issue and mechanical kiln window; 15 – head water-cooled heat-insulated transverse beam; 16 – crossbeam with the pipeline for gas input

несколько с шагом 3 – 5 м. Аналогично ПГ также вводится под заготовки.

**Выводы.** Натурное измерение толщины окалины в одних и тех же участках («точках») заготовок после их нагрева в печи является наиболее простым и надежным промышленным методом оценки изменения угара стали.

Предложенные и испытанные варианты камерных и проходных печей для безокислительного нагрева стали по тепловому КПД, КИТ, сложности обслуживания и выбору материалов для строительства практически принципиально не отличаются от обычных современных печей с одностадийным сжиганием топлива и различной степенью рекуперации тепла отходящих газов.

Любое повышение температуры воздуха горения и его обогащения кислородом, вплоть до использования чистого кислорода, не позволяют реализовать полноценный безокислительный нагрев стали открытым пламенем, по теплотехническим и экономическим показателям конкурентноспособный обычному традиционному нагреву, без аэродинамического разделения зон внутривспечного стадийного сжигания топлива.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глишков М.А. Прокатные и кузнечные печи. – Свердловск – Москва: ОНТИ, 1936. – 399 с.
2. Сталь на рубеже столетий. / Под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2001. – 664 с.
3. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.
4. Окисление и обезуглероживание стали / А.И. Ващенко, А.Г. Зеньковский, А.Е. Лифшиц и др. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
5. Леонидова М.Н., Шварцман Л.А., Шульц Л.А. Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируруемыми атмосферами. – М.: Металлургия, 1980. – 264 с.
6. Темлянец М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
7. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е., Усачев А.Б. Нагревательные и термические печи Стальпроекта: к 100-летию металлургического бюро В.Е. Грум-Гржимайло. 1915 – 2015 гг. / Под ред. А.Б. Усачова. – М.: Ин-т Стальпроект, 2015. – 260 с.
8. Шульц Л.А. По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 10. С. 55 – 69.
9. Курносое В.В., Шульц Л.А. Безокислительный нагрев стали в камерных печах кузнечно-штамповочного производства // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 1. С. 9 – 13.
10. Бербенов В.И. Сжигание газа в печах безокислительного и малоокислительного нагрева. – Л.: Недра, 1988. – 175 с.
11. Курносое В.В., Шульц Л.А. Сравнительная оценка энерго-экологических показателей печей безокислительного нагрева стали перед обработкой давлением // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 5. С. 65 – 69.
12. Михайленко Ю.Е., Темлянец М.В. Исследование кинетики процессов окисления и обезуглероживания высокоуглеродистых сталей при нагреве // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 10. С. 44 – 47.
13. Темлянец М.В. Исследование процессов окисления и обезуглероживания стали при нагреве // Сталь. 2007. № 3. С. 58 – 60.
14. Курносое В.В., Шульц Л.А. Проблемы безокислительного обезуглероживающего высокотемпературного нагрева стали в топливных печах и возможные пути их решения // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 11. С. 10 – 14.

Поступила 30 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 7, pp. 470–478.

## ON THE PROBLEMS OF CONTROL AND REDUCTION OF HIGH-TEMPERATURE LOSS OF STEEL IN HEATING FURNACES

L.A. Shul'ts

National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS),  
Moscow, Russia

**Abstract.** The problem of assessment of the steel loss in the thickness of scale is considered for industrial furnaces. The possibilities of different ways to reduce steel oxidation are analyzed. Particular attention is paid to the attendant difficulties of decrease of steel loss by reducing the oxidant consumption coefficient ( $n$ ). The reality of achievement of substantially nonoxidative steel heating in industrial furnaces at present is shown. The author has highlighted their important technological characteristics: almost molecular mixing of the primary components of combustion (natural gas at  $n = 0.48 - 0.5$ ), the synchronicity of the burners work and limit  $n$  deviation at regulation of primary combustion of fuel  $\Delta n \leq 0,01$ , the effective jet-mechanical throttling of primary gas flow precluding the reverse circulation of the primary products of incomplete combustion from the post-combustion zone to the metal heating zone. Directions of design and work options of forging and rolling furnaces are proposed with the achievement of the relevant indicators for the reduction or complete suppression of steel loss. The problems of internal high-temperature oxidation of silicon of transformer steel are particularly analyzed as well as the nondecarburization heating of ball-bearing steel.

**Keywords:** scale, steel loss, soot, decarbonization, furnace,  $n$ , staging combustion.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-470-478

#### REFERENCES

1. Glinkov M.A. *Prokatnye i kuznechnye pechi* [Rolling and forging furnaces]. Sverdlovsk–Moscow: ONTI, 1936, 399 p. (In Russ.).
2. Belyanchikov L.N., Borodin D.I., Valavin V.S. etc. *Stal' na rubezhe stoletii* [Steel on the turn of the centuries]. Karabasov Yu.S. ed. Moscow: MISIS, 2001, 664 p. (In Russ.).
3. Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M., Khodorovskaya I.Yu. *Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii chernoi metallurgii* [Energy-efficient and resource-saving technologies of ferrous metallurgy]. Ekaterinburg: ООО «УИПЦ», 2012, 670 p. (In Russ.).
4. Vashchenko A.I., Zen'kovskii A.G., Lifshits A.E. etc. *Okslenie i obezуглероживание stali* [Oxidation and decarburization of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 336 p. (In Russ.).
5. Leonidova M.N., Shvartsman L.A., Shul'ts L.A. *Fiziko-khimicheskie osnovy vzaimodeistviya metallov s kontroliruemymi atmosferami* [Physico-chemical principles of interaction of metals with controlled atmosphere]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 264 p. (In Russ.).



6. Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Okislenie i obezuglerozhivanie stali v prtsessakh nagreva pod obrabotku davleniem* [Oxidation and decarburization of steel during heat treatment under pressure]. Moscow: Teplotekhnika, 2006, 200 p. (In Russ.).
7. Gusovskii V.L., Lifshits A.E., Usachev A.B. *Nagrevatel'nye i termicheskie pechi Stal'proekta: k 100 – letiyu metallurgicheskogo byuro V.E. Grum – Grzhimailo. 1915-2015 gg.* [Heating and heat-treatment furnaces of Stalproekt: to the 100th Anniversary of Groom-Grzhimailo Metallurgical Bureau. 1915-2015]. Usachov A.B. ed. Moscow: In-t Stal'proekt, 2015. 260 p. (In Russ.).
8. Shul'ts L.A. Following the traces of development and implementation of furnaces with the staged fuel combustion and their perspectives in metallurgy. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2005, no. 10, pp. 62–69. (In Russ.).
9. Kurnosov V.V., Shul'ts L.A. Nonoxidizing steel heating in blacksmith's shop batch furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 1, pp. 9–13. (In Russ.).
10. Berbenev V.I. *Szhiganie gaza v pechakh bezokislitel'nogo i malookislitel'nogo nagreva* [Combustion of gas in nonoxidative and low oxidative heating furnaces]. Leningrad: Nedra, 1988, 175 p. (In Russ.).
11. Kurnosov V.V., Shul'ts L.A. Energy and ecology indexes comparative estimation of nonoxidizing heating furnaces before metal forming. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 5, pp. 65–69. (In Russ.).
12. Mikhailenko Yu.E., Temlyantsev M.V. Kinetic study of oxidation and decarburization processes at high-carbon steel heating. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2006, no 10, pp. 44–47. (In Russ.).
13. Temlyantsev M.V. Investigation of the processes of oxidation and decarbonization of steel at heating. *Stal'.* 2007, no 3, pp. 58–60. (In Russ.).
14. Kurnosov V.V., Shul'ts L.A. High temperature nonoxidizing non-decarburizing heating of steel in combined fuel furnaces: problems and decisions. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 11, pp. 10–14. (In Russ.).

**Information about the author:**

**L.A. Shul'ts**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”  
(shul'ts@4polusa.ru)

Received March 30, 2016