



The possibilities of application of the metal jet heating before rolling are shown.

*В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Президиум НАН Беларуси,
И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ*

УДК 621.783

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПЕРЕД ПРОКАТКОЙ

В существующих в настоящее время высоко-температурных печах прокатного, кузнечного и штамповочного производства определяющим фактором передачи теплоты к нагреваемому металлу является создание условий радиационного теплообмена между источниками излучения и нагреваемым металлом. Как известно [1–3], теплообмен излучением – это основной способ передачи теплоты в печах с температурой выше 1000 °С (85–95% теплоты передается на поверхность нагреваемых материалов излучением и лишь 5–15% – конвекцией).

При этом основным механизмом интенсификации теплообмена излучением является повышение температуры источников излучения, увеличение степени черноты поверхностей, участвующих в теплообмене, и создание наиболее рациональной геометрии системы, в которой протекают теплообменные процессы.

Источниками излучения в нагревательных печах могут быть боковые стены, под и свод печи, причем доля свода в теплообмене излучением при нагреве металла преобладающая (до 70%). Повышение температуры свода печи приводит к необходимости применения дорогостоящих огнеупорных материалов, усилению теплостойкости конструкции свода и, как следствие, удорожанию конструкции и эксплуатации печи. Также следует отметить, что при организации сводового отопления (установка газопламенных горелок на свод) вследствие конструктивных особенностей горелок сжигание топлива происходит непосредственно на поверхности огнеупорного свода с вероятностью получения температур, близких к калометрическим $T_{св} > 1800$ °С, что значительно снижает срок службы огнеупоров, ведет к перерасходу топлива и ухудшению равномерности нагрева металла.

Таким образом, возможности дальнейшей интенсификации процессов нагрева металла в высоко-

температурных установках за счет увеличения доли радиационной составляющей теплообмена, на наш взгляд, практически исчерпаны, поскольку температура греющей среды лимитируется огнеупорностью используемых в печестроении материалов, а степень черноты поверхностей теплообмена близка к единице. В то же время степень черноты продуктов сгорания топлива в существующих конструкциях относительно низкая [4]. Поэтому в последнее время ведущими фирмами в области строительства металлургических печей исследуются и находят практическое применение различные способы интенсификации тепловой работы печей путем повышения конвективной составляющей теплообмена (в частности, за счет организации струйного конвективного теплообмена).

Интенсификация конвективного теплообмена требует создания высоких скоростей газообразного теплоносителя при его канальном движении или организации его рециркуляции в рабочем пространстве печи. Такой вид нагрева основан на применении специальных газогорелочных устройств, или так называемых скоростных горелок, обеспечивающих высокую скорость движения продуктов сгорания (более 100 м/с). При этом за счет высокой скорости потока продуктов сгорания и разрушения пограничного слоя ударной струей конвективная составляющая теплоотдачи резко возрастает и составляет не менее 50% от суммарного теплового потока [5]. Такая интенсификация теплообмена существенно ускоряет процесс нагрева при одновременном улучшении качества нагрева за счет снижения окалинообразования и обезуглероживания поверхности по сравнению с традиционным нагревом.

Вместе с тем струйный конвективный теплообмен, позволяя достичь высоких значений плотности теплового потока на металл, имеет объективно присущий ему недостаток – локальность

подвода теплоты, наблюдаемую в зоне взаимодействия струи с поверхностью нагреваемого металла. Этот фактор особенно заметно проявляется в условиях пониженной температуры кладки, что характерно для печей струйного нагрева, поскольку составляющая теплового потока излучением перестает играть доминирующую роль. В технологическом плане локальность подвода теплоты сказывается на снижении качества нагрева металла для последующей пластической деформации. С теплотехнической точки зрения отрицательное воздействие указанного фактора можно минимизировать увеличением числа струй, рациональным выбором схемы их расположения, соответствующим подбором мест отвода продуктов сгорания топлива из печи и т.д.

Схемы использования высокой энергии струй продуктов сгорания можно принципиально разделить на две категории: направление струй непосредственно на поверхность нагреваемого металла (струйный нагрев); создание вихревого (вращательного) движения газов в рабочем объеме печи (циклонно-вихревой нагрев).

В основу струйных технологий современного нагрева положено применение остроатакующих струй теплоносителя, направленных на металл под прямыми углами и омывающих его с высокими скоростями. Это направление разделяется на струйный и струйно-факельный нагрев металла, отличающийся способами сжигания топлива.

При струйном нагреве процесс горения начинается и практически завершается в горелочных тоннелях, а в печное пространство поступают высокотемпературные струи продуктов сгорания. При струйно-факельном нагреве горение высокотемпературных струй растянуто между соплом горелки и металлом.

Опыт эксплуатации промышленных печей скоростного струйного нагрева машиностроительного производства показывает, что в этом случае удается добиться уменьшения удельного расхода топлива на 30–50%, увеличения производительности, а также снижения затрат на ремонт футеровки [6].

Внедрение в практику печестроения скоростных горелок придало новый импульс разработке новых тепловых схем промышленных печей. Высокоскоростные потоки продуктов горения таких устройств (скорости истечения газовых струй порядка 100–120 м/с) в сочетании с новыми легкими огнеупорами позволили отказаться в ряде случаев от схем с применением рециркуляционных каналов, повысить равномерность температурных полей в рабочем пространстве печей. При решении современных тепловых схем все более широкое распространение находят отработанные в институте «Теплопроект» (г. Санкт-Петербург) импульсные системы отопления. Использование импульсных и реверсивных систем

движения газов в печах позволяет решить вопросы равномерности температурного поля в рабочем пространстве и экономить до 10–12% топлива [7].

Для нагрева термически массивного металла используется импульсно-скоростной нагрев струями продуктов полного сгорания топлива, при котором граничные условия изменяются во времени. При осуществлении нагрева предусмотрены этапы (циклы), состоящие из периодов нагрева и выдержки.

Результаты исследований влияния основных режимных факторов, определяющих тепловое состояние металла (длительность цикла нагрева, соотношение длительностей периодов нагрева и выдержки и величин коэффициентов теплоотдачи в эти периоды; температуры окружающей среды), показали, что равномерность прогрева металла и соответственно общее время его нагрева определяется и схемой организации граничных условий — симметричной или асимметричной. В свою очередь при асимметричной схеме нагрева изменение граничных условий может быть представлено не только как функция времени, но и координат поверхности нагрева.

Сравнительно эффективным приемом интенсификации теплообмена в печах оказался отработанный в институте «Теплопроект» нагрев изделий ударной струей. Высокая скорость нагрева изделия при минимальном времени разогрева печи до рабочего состояния обеспечивает низкое окисление и экономию топлива на 20–30% по сравнению с нагревом в камерных и полуметодических печах. Этот вид нагрева все шире используется как при нагреве перед ковкой и термообработкой стальных заготовок, так и при нагреве цветных металлов, в частности алюминиевых заготовок. Еще одним преимуществом применения струйного нагрева является улучшение качества стали [8]. Сталь при скоростном режиме нагрева обладает более мелкозернистой структурой, имеет лучшие пластические свойства при высокой температуре, требует меньших затрат энергии на последующую деформацию. Кроме того, при ускоренном нагреве неметаллические включения, находящиеся между зёрнами, не успевают оформиться в крупные скопления, увеличивающие внутреннее сопротивление металла. Правильно организованный скоростной нагрев позволяет существенно снизить окисление и обезуглеживание стали.

Данные промышленных экспериментов по изучению тепловой работы нагревательных печей [6] показали возможность интенсификации нагрева стали в методических толкательных печах прокатных станов 280 и 325 завода «Днепроспецсталь» за счет использования метода скоростного струйного нагрева металла.

При использовании этого метода нагрева значительный внешний тепловой поток на нагреваемой

поверхности обеспечивается за счет конвективной составляющей. Высокие значения коэффициента теплообмена конвекцией ($\alpha_k > 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) обусловлены большими скоростями движения продуктов сгорания ($> 150 \text{ м}/\text{с}$), которые направлены на поверхность металла, разрушая пограничный слой и вызывая интенсивную теплоотдачу к металлу. Варьируя скорость струи продуктов сгорания, можно изменять значение α_k в широких пределах и тем самым управлять интенсивностью теплообмена в печи.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований была реконструирована двухзонная методическая толкательная печь стана 280 завода «Днепроспецсталь» [6]. Печь (рис. 1) оборудована семью инжекционными горелками: четыре горелки установлены в верхней и три в нижней сварочных зонах. Заготовки вдоль печи подают по двум глассажным трубам, в конце — по монолитному поду. В качестве топлива используется коксо-доменный газ с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^p = 10 \text{ МДж}/\text{м}^3$ с подогревом воздуха в керамическом рекуператоре. Общий расход газа на печь $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В результате реконструкции в своде методической зоны в шахматном порядке установлены пять скоростных газовых горелок под углом $25\text{--}30^\circ$ к встречно нагреваемому металлу.

С целью определения эффективности струйного нагрева были проведены экспериментальные исследования по нагреву металла в реконструируемой печи [6]. В установленном режиме работы печи разжигали скоростные горелки, чем повышали тепловую нагрузку на металл в методической зоне на $20\text{--}25\%$. При этом увеличивали темп подачи заготовок (производительность печи) на $15\text{--}20\%$, что обусловлено возможностью прокатного стана.

В качестве примера на рис. 2 (пунктирные кривые) показана диаграмма нагрева заготовок из стали ШХ15 в реконструированной печи.

Сравнение диаграмм нагрева до и после реконструкции свидетельствует о том, что, несмотря на сокращение пребывания заготовок в печи, равномерность их нагрева не ухудшилась. Резкое повышение температуры нагреваемой поверхности происходит в конце методической зоны, т.е. когда заготовка попадает непосредственно под струю продуктов сгорания. При этом увеличивается температурный перепад по сечению заготовки, который в конце нагрева (рис. 2) уменьшается до 30°С . Последующие лабораторные исследования показали, что увеличение скорости нагрева не вызывает нарушения сплошности заготовок.

С учетом того что в рассматриваемой печи нагревают марки сталей, большинство которых крайне чувствительны к окислению и обезуглероживанию, одной из важных задач становится повышение качества нагрева. Эта задача в данном случае может быть решена несколькими способами: увеличением скорости нагрева металла, т.е. уменьшением времени пребывания металла в печи при высоких температурах; созданием специальной атмосферы в высокотемпературных зонах.

Из результатов экспериментальных исследований следует, что время пребывания заготовки при температурах, характерных для интенсивного окисления и обезуглероживания, до и после реконструкции печи практически не изменилось, т.е. увеличение скорости нагрева в данном случае не привело к ухудшению качества нагрева металла. Поэтому задача снижения окисления и обезуглероживания решалась созданием восстановительной атмосферы в высокотемпературных зонах печи.

Установлено, что при таком способе нагрева

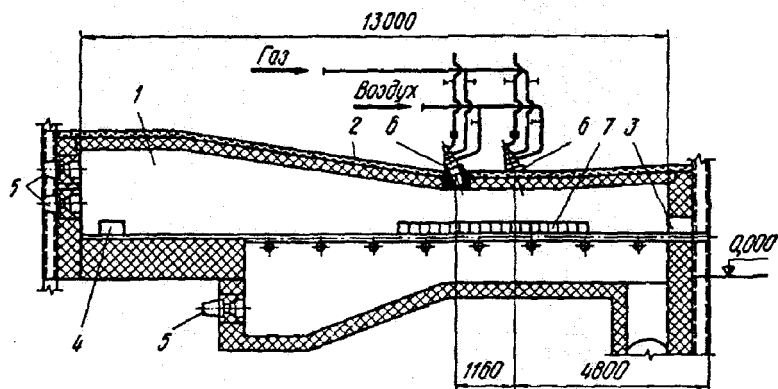


Рис. 1. Схема двухзонной методической толкательной печи с дополнительно установленными скоростными горелками: 1 — рабочее пространство; 2 — кладка; 3 — окно загрузки; 4 — окно выгрузки; 5 — инжекционные горелки; 6 — скоростные горелки; 7 — нагреваемый металл

по сравнению с нагревом до реконструкции печи

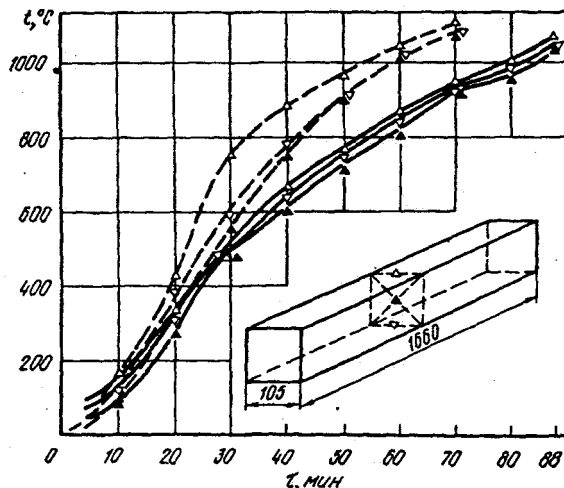


Рис. 2. Диаграмма нагрева блока из стали ШХ15 в двухзонной методической толкательной печи. Сплошные кривые — до реконструкции; пунктирные кривые — с дополнительно установленными скоростными горелками

снижается окисление и обезуглероживание стали в среднем на 30 и 20% соответственно. Характерным при реализации описанного способа нагрева металла является то, что общий расход до и после реконструкции не изменился. Увеличение тепловой нагрузки методической зоны компенсировалось соответствующим снижением расхода топлива, подаваемого в сварочные зоны, что позволило снизить удельные расходы тепла в среднем на 10%.

В настоящее время имеется небольшой опыт использования струйного нагрева в печах металлургического производства, хотя перспективы его применения очевидны, что подтверждено теоретическими, экспериментальными и конструкторскими разработками, проведенными, в частности, ВНИИМТом, Стальпроектом [9, 10]. Например, как показано в работе [6], при использовании метода высокоскоростного струйного нагрева стали в методических толкательных печах прокатных станков 280 и 325 завода «Днепросталь» удалось снизить окисление и обезуглероживание на 30 и 20%, а также повысить производительность на 15–20% без ухудшения качества нагрева.

Повышение эффективности работы печей скоростного струйного нагрева металла в условиях металлургической и машиностроительной отрасли промышленности может быть достигнуто двумя способами – традиционным (рекуперация теплоты отходящих газов, удлинение неотопляемой зоны, применение двухстадийного нагрева) и за счет интенсификации внешнего теплообмена (выбор формы рабочего пространства печи, рациональное расположение горелок, применение импульсной системы отопления, создание оптималь-

ных условий топливосжигания). При этом, если развитие первого направления сдерживают технические ограничения, связанные, в первую очередь, с конструктивными возможностями, то второе направление повышения технико-экономических показателей печи имеет значительный потенциал.

Литература

1. Расчеты нагревательных печей / С.И.Аверин, Э.М.Гольдфарб, А.Ф.Кравцов и др. Киев: Техника, 1969.
2. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В.И.Тимошпольский, Ю.А.Самойлович, И.А.Трусова и др.; Под общ. ред. В.И.Тимошпольского, Ю.А.Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
3. Металлургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. Т. 1. / В.И.Губинский, В.И.Тимошпольский, В.М.Ольшанский и др.; Под общ. ред. В.И.Тимошпольского, В.И.Губинского. Мн.: Белорусская наука, 2007.
4. Прибытков И.А., Кобахидзе В.В., Кривандин В.А. О задаче внешнего теплообмена при радиационно-струйном нагреве металла // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. 1998. № 7. С. 62–65.
5. Краснокутский П.Г. Исследование и разработка печей скоростного струйного нагрева заготовок на сплошном керамическом поду: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., МИСиС, 1980.
6. Эффективность применения струйно-факельного нагрева в промышленных печах / В.Г. Лисиенко, Г.К. Маликов, Ю.К. Маликов и др. // Сталь. 1996. № 6. С. 45–48.
7. Асатуров В.Н. Интенсификация тепловой работы нагревательных печей // Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». М., 3–5 дек., 2002.
8. Копытов В.Ф. Новые методы газового нагрева. М.: Металлургиздат, 1962.
9. Скоростной нагрев стальных заготовок в струйной печи / Ф.Р. Шкляр, Г.К. Маликов, В.П.Фотин и др. // Металлургическая теплотехника. 1978. № 6. С. 61–65.
10. Струйный газовый нагрев и охлаждение листового проката / В.А. Леонтьев, Г.К.Маликов, Н.А.Зубкова и др. // Сталь. 1981. № 2. С. 83–85.