

*Н. Е. Kastor, «Buderus Edelstahlwerke» AG, Wetzlar  
U. Bonnet, «WS Wärmeprozessstechnik GmbH»*

# ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ НАГРЕВ ШАХТНОЙ ПЕЧИ СОВРЕМЕННЫМИ РЕКУПЕРАТИВНЫМИ ГОРЕЛКАМИ

В этой статье описан опыт успешного применения рекуперативных горелок в шахтной печи для нагрева поковок на предприятии Buderus Edelstahl GmbH. С целью сбережения энергии, шахтная печь, в которой были установлены горелки, использующие для горения холодный воздух, за 20 дней реконструкционных работ была оснащена современными рекуперативными горелками.

Богатый традициями завод по производству высококачественной стали Buderus Edelstahl GmbH, отметивший в 2005 году свой 85-летний юбилей, находящийся в городе Wetzlar, Германия, относится к самым знаменитым немецким производителям высококачественной нержавеющей стали. В руках производителя находится весь технологический цикл — от процесса плавки вплоть до получения готового изделия.

Для изготовления продукции, наряду со многими установками, печи для отжига и печи для отпуска, вертикальные и горизонтальные, являются важными составляющими в кузнечно-прессовом цехе. В качестве вертикальной печи, например, используется шахтная печь, работающая на природном газе, для тер-

мической обработки поковок с максимальной длиной 11,4 м. Примыкающий процесс закалки производится в воде, масле или полимере.

## ИСХОДНАЯ СИТУАЦИЯ

Шахтные печи на протяжении многих лет оправдали себя во всех областях практики закалки, когда поковки, длинные валы, роторы турбин, полые валы и т.д. нужно было термически обработать.

При этом речь идет о цилиндрических, вертикально стоящих печах, которые сверху закрываются движущейся крышкой. Они были разработаны, чтобы горячее изделие обрабатывалось во избежание искажения или деформации при постоянной, очень равномерной температуре. Шахтные печи, прежде всего, применяются для закалки, отжига и отпуска стали. Кран необходим для быстрой выгрузки из печи горячей, раскаленной садки и быстрого переноса для последующей закалки в различных средах. Характерным для описываемых печей является действительно несложная конструкция, которая при использовании правильно подобранных горелок требует незначительных затрат на обслуживание.

Описываемая здесь шахтная печь №630 с полезной длиной 12 м и шириной в проеме 2,5 м была пущена в эксплуатацию в 1965 году. Для максимально хорошего теплораспределения печь разделена на семь зон — равномерно по высоте — и по расположению. На каждую зону приходится по три горелки — расположенные друг относительно друга по окружности со смещением в 120 градусов. Всего в шахтной печи установлена 21 горелка устаревшей конструкции с подачей холодного воздуха. Каждая горелка имела потребляемую мощность 75 кВт. Через центральный коллектор отходящих газов, который поддерживает одновременно с помощью клапана постоянное давление в печи, отходящие газы горелок направлялись в дымовую трубу.

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ НАГРЕВЕ ВОЗДУХА

Вследствие постоянного роста цен на энергоносители перед Buderus Edelstahl GmbH постоянно встает задача использовать весь потенциал энергосбережения и искать экономически выгодные решения. Возможность сохранения энергии, используя для горения предварительно догретый до высокой температуры воздух, отражает состояние современной техники и успешно применяется на многих участках Buderus Edelstahl GmbH. На рисунке 1 отображена зависимость коэффициента использования топлива КИТ  $\eta$  при сжигании природного газа в зависимости от температуры отходящего газа на входе рекуператора и эффективности догрева воздуха  $\epsilon$ .

Области КИТ показаны для различных методов догрева воздуха — в центральном рекуператоре, рекуперативные горелки (REKUMAT®) и регенеративные горелки (REGEMAT®).

Например, при температуре процесса 1000 °С КИТ горелки без догрева воздуха составляет 50%, при применении рекуперативной горелки с эффективностью догрева воздуха  $\epsilon=0,65$  — около 80%, что соответствует экономии в 37%. Естественно,

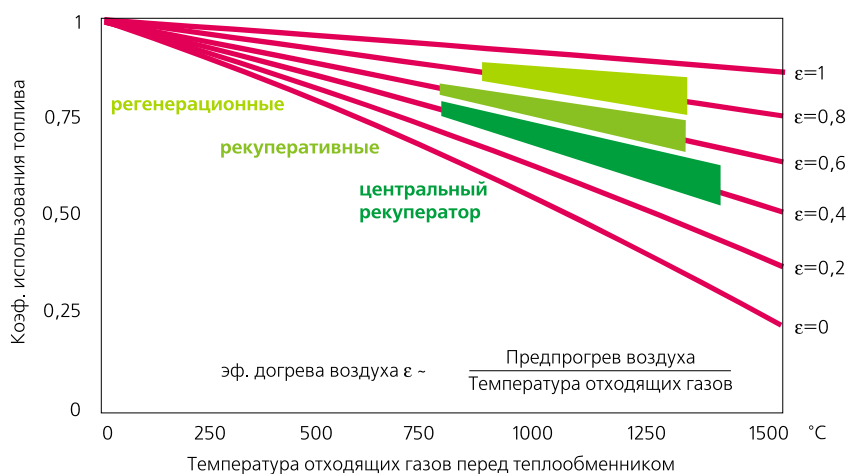


Рис. 1. КИТ как зависимость температуры отходящих газов и эффективности догрева воздуха

что при такой децентрализованной системе рекуперации тепла, в отличие от системы с центральным рекуператором, для каждой горелки необходимо установить свой рекуператор. Наряду с повышением потенциала энергосбережения (рис. 1), рекуперативная горелка имеет преимущество в том, что большая часть отходящих газов (ок. 80%) отводится из печи через горелки. В результате этого взаимное влияние зон в печи снижается. Другим преимуществом децентрализованной рекуперации тепла с помощью рекуперативных горелок являются снижение потерь тепла и уменьшение расходов для прокладки трубопроводов и арматуры, так как воздух для горения подается к горелкам холодным.

### Горелка REKUMAT® MSJ 200

В описанной выше шахтной печи №630 все 21 горелки были заменены горелками REKUMAT® MSJ 200. Данная горелка изображена на рисунке 2.

Горелки REKUMAT® MSJ 200 была спроектирована так, что несмотря на эффективность догрева воздуха приблизительно до 70%, гарантируется выброс NOx в пределах допустимой нормы. В качестве теплообменника для данного типа горелки используется ребристый рекуператор из хромоникелевой стали. Принцип действия рекуперативной горелки может быть описан следующим образом: отходящий газ засасывается из пространства печи и уходит в дымовой коллектор по внешней стороне ребристого рекуператора. Воздух на горение поступает встречным потоком по внутренней стороне рекуператора. Предварительно нагретый воздух вместе с газообразным топливом подается для горения.

Однако, поскольку из-за сильного догрева воздуха в рекуператоре увеличивается также температура пламени и поэтому повышается доля NOx в отходящем газе, то необходимо принять меры по снижению выброса NOx. У горелок REKUMAT® для этого служит ступенчатое горение и рециркуляция отходящих газов. В керамическую камеру горения со значительным избыточным давлением подается приблизительно 2/3 воздуха для основного горения. С подобным же высоким давлением воздух второй ступени поступает в пространство горения из концентрично расположенных вокруг камеры горения сопел, смешиваясь сначала с печными газами, а затем, попадая в основную струю, которая уже тоже смешалась с газами печи.

Благодаря охлаждению пламени дополнительным воздухом второй ступени, температура пламени снижается до допустимых пределов. Высокое давление в камере горения и, в результате этого, высокая скорость (около 100 м/с) струи пламени, обеспечивают высокий момент

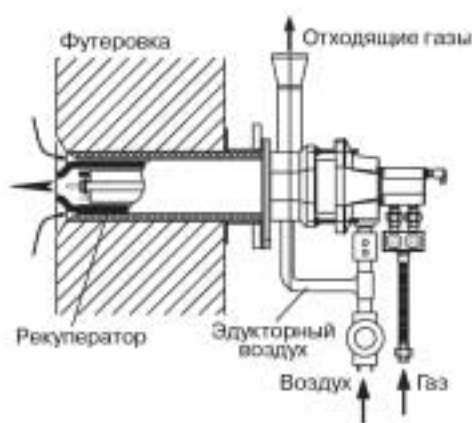


Рис. 2. REKUMAT MSJ 200 для прямого нагрева

смешивания струи пламени с отходящим газом, полное сжигание природного газа и оптимальное преобразование энергии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассматриваемая здесь шахтная печь на протяжении последних лет потребляла при нагреве 60 м<sup>3</sup> природного газа на каждую тонну отжигаемой стали. Остальные расходы/потери, как, например, потери тепла сквозь стены, излучение через отверстия и КИТ при этом также учтены.

После того, как установленные горелки были заменены 21 горелкой REKUMAT® MSJ 200, а система отходящих газов была преобразована соответственно новым требованиям, удельный расход на тонну отожженной стали удалось сократить на 38%, значительно ниже 50 м<sup>3</sup> природного газа. Для оптимальной эксплуатации горелок REKUMAT® применяется режим тактового управления Вкл./Выкл. Только так может быть достигнута необходимая высокая скорость импульса пламени, что гарантирует оптимальный теплообмен и по низким показателям NOx. При этом управление горелками осуществляется по кругу. При этом мы не отказываемся от оправдавшего себя разделения печи на семь зон. Благодаря высокой скорости импульса пламени горелок REKUMAT® и хорошему перемешиванию дымовых газов в печи, теплораспределение в печи и на поверхности материала составило 3 по всей высоте печи (около 12 м).

### ПЕРСПЕКТИВЫ

Результат свидетельствует о том, что при использовании рекуперативных горелок с рекуператором из хром-никелевой стали можно достичь высокого относительного догрева воздуха. Однако использование рекуперативных горелок с металлическим рекуператором ограничивается температурой процесса до 1150 °С. Решение этой проблемы было разработано в 1998 году в одном основополагающем исследовании

по разработке и оптимизации керамических рекуперативных горелок [4] в результате было установлено, что применение полностью керамического зубчатого рекуператора возможно до 1300 °С. Для использования при температурах свыше 1150 °С можно, с одной стороны, значительно увеличить температуру догрева воздуха, а с другой стороны, значительно снизить расход энергии при рабочих температурах. Керамические рекуперативные горелки типа REKUMAT® успешно применяются уже на протяжении многих лет не только для прямого, но также и для косвенного нагрева в высокотемпературных процессах. При непосредственном нагреве полностью керамическая рекуперативная горелка устанавливается в керамических тупиковых излучающих трубах с жаровыми трубами. Такая система предназначена для работы при высоких термических нагрузках, поэтому возникает возможность увеличить температуру процесса. Это позволяет снизить потребление топлива и одновременно увеличить мощность печной установки.

### ВЫВОДЫ

Сконструированные для различных диапазонов мощностей современные рекуперативные горелки REKUMAT® — из стали или керамики — имеют следующие отличительные признаки и преимущества при применении как для прямого так и для косвенного нагрева печей:

- Встроенные теплообменники в виде ребристого рекуператора из стальной хромоникелевой литья или в виде зубчатого рекуператора из SiC керамики, имеют коэффициент предварительного догрева воздуха  $\epsilon=0,6-0,7$ ;
- Скорость струи на выходе из камеры горения из SiC керамики составляет от 100 до 150 м/с;
- Автоматический режим вкл./выкл. с зажиганием и контролем пламени;
- Такие горелки покрывают температурный диапазон от 500 до 1250 °С.