

## Применение новых плоскопламенных горелок в печах с выкатным подом

Нагрев кузнечных слитков в печах с выкатным подом можно значительно улучшить при применении горелок специальной конструкции с керамическим соплом, равномерно распределяющим тепло, уменьшая при этом уровень образования окалины и повышая производительность.

Применение таких горелок обеспечивает очень низкий уровень выделения окислов азота (NOx) и является экономически выгодным благодаря значительной экономии энергии.

**Uwe Bonnet, Hans Kaczor и Joachim Georg Wünnig**  
**WS Wärmeprozessstechnik, GmbH**  
**и Buderus Edelstahlwerke AG**

### Введение

На специализированном металлургическом заводе Buderus установлено технологическое оборудование для производства горячекатаной и холоднокатаной полосы, проката, литья и поковок, с годовой производительностью около 85000 тонн. Слитки нагреваются в отопляемых газом автоматических печах с выкатным подом. На заводе установлено оборудование для обрубки, печи для отжига, вертикальные и горизонтальные печи для отпуска. Максимальная длина заготовки, помещаемой в печь с выкатным подом, 15 метров. Для механической обработки имеются станки с цифровым управлением (токарные, отрезные, сверлильные и т.д.) различных размеров. Сортамент кузнечных изделий включает в себя механически обработанные изделия для оборудования общего назначения и для энергетического оборудования, механически обработанные стальные валы и кованные штанги. Максимальный вес составляет около 80 тонн.

### Исходная ситуация

Печи с выкатным подом предназначены для термообработки особо крупных заготовок. Рассматриваемая печь имеет длину примерно 10 м и ширину 4.5 м, и оборудована 18 высокоскоростными рециркуляционными горелками мощностью 250 кВт каждая в соответствии с номиналом, общий максимальный расход природного газа 450 м<sup>3</sup>/час. На каждой из двух боковых стенок было установлено по 9 таких горелок, горящих прямым факелом с сильной струей. Тележки загружаются отдельно, задвигаются на место, при этом автоматически обеспечивается герметизация между дном печи и днищем тележки. Пламя и горячие газообразные продукты сгорания направляются между днищем тележки и кузнечными слитками до противоположной стенки, откуда они направляются вверх к своду и, в конечном итоге, повторно увлекаются той же первоначальной струей из горелки (Рис 1).

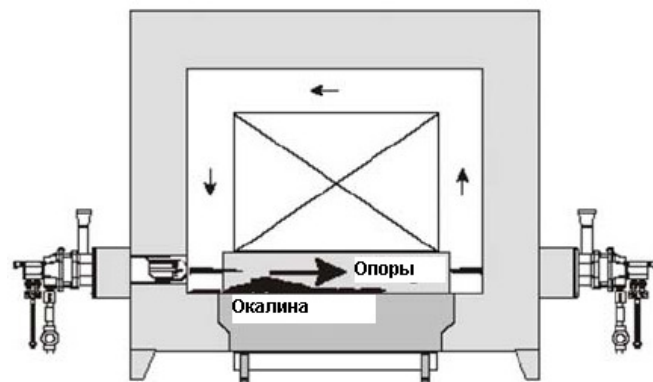


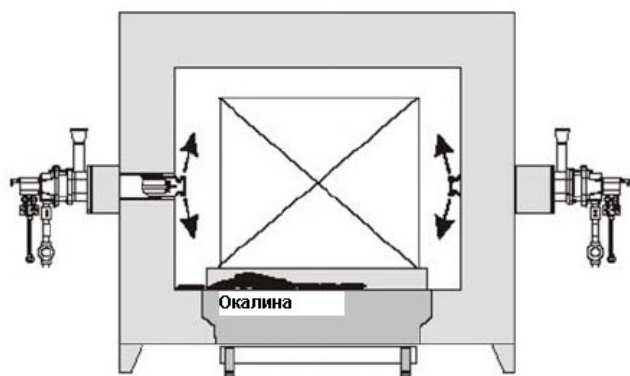
Рисунок 1 – Поперечное сечение печи с выкатным подом

Ввиду особенностей такой конструкции, нагреваемые перед ковкой слитки нельзя укладывать непосредственно на дно тележки, их необходимо размещать в строгом порядке на прочных стальных опорах размером 400 × 400 мм. Опоры необходимо уложить в точно определенные места перед загрузкой, в противном случае пламя будет бить непосредственно в поверхность слитка, следствием чего будет дополнительное окисление и нарушение распределения тепла. При таком неправильном нагреве вследст-

вие отклонения факела, возможен локальный перегрев опоры и слитка, и возможно нарушение процесса прогрева всего слитка, либо этот процесс займет больше времени. Кроме того, возможно также повреждение насадок задействованных горелок вследствие чрезмерного перегрева. Максимальный общий расход топлива был **210**  $\text{нм}^3/\text{час}$  природного газа во время, необходимого для регулирования по принципу вкл.-выкл.: 60 секунд горелки на одной боковой стенке, затем 60 секунд горелки на противоположной стенке и т.д., поэтому в каждый конкретный момент времени была доступна **только половина** из установленных 18 горелок. Печь была поделена на три зоны. Предварительный нагрев воздуха и способы снижения уровня выбросов окислов азота вообще не применялись.

### **Горелки REKUMAT® с плоским факелом**

На Рисунке 2 представлена схема после реконструкции: по 9 горелок Reкуmat® с плоскопламенными насадками, снабженные встроенными рекуператорами, установлены в тех же точках на обеих боковых стенках, мощность каждой горелки 180 кВт.



**Рисунок 2 – Поперечное сечение реконструированной печи**



**Рисунок 3 – Горелки с плоским факелом в кузнечной печи**

Суммарный максимальный расход газа после реконструкции составил **315**  $\text{нм}^3/\text{час}$  при работе **всех** 18 горелок, распределенных по трем зонам и работающих по круговой схеме. Благодаря увеличению суммарной выходной мощности можно производить нагрев слитков быстрее, а также возможно повышение производительности печи и использование циклов нагрева с более высокими температурами. Новые горелки с плоским факелом располагаются далеко от нижнего края тележки. Как можно видеть на Рис 3, поток тепла больше не направлен на слиток, благодаря расположению сопел горелок тепло равномерно распределяется по всей печи. На Рис 3 горелки с плоским факелом работают в режиме «Пламя», и можно отчетливо видеть факелы боковых сопел.



**Рисунок 4 – Сопло горелки с плоским факелом внутри печи**

На Рисунке 4 представлен крупный план сопла горелки, установленной в середине стенки печи, изолированной керамическим волокном. Поскольку факел больше не направлен под слиток, стальные опоры также могут быть значительно меньше. Это обеспечивает более быстрый и экономичный процесс нагрева благодаря уменьшению балласта (почти в 4 раза), нагреваемого вместе со слитком.

### **Беспламенное горение в высокотемпературных печах**

Сегодня усилия по улучшения горелок и систем нагрева направлены на сокращении потерь энергии с отходящими печными газами и снижении количества вредных выбросов. В частности, для высокотемпературных процессов используется хорошо известная технология предварительного нагрева воздуха. Однако соответствующий потенциал экономии энергии используется только частично, и одной из главных причин тому является повышение температуры факела, что приводит к чрезмерному образованию термического NOx.

Возможность уменьшения температуры факела и, тем самым, уменьшения выделения оксидов азота, дает инертизация факела: процесс основывается на принципе смешивания больших количеств печных газов с воздухом для сгорания перед реакцией с топливом. Захват инертных печных газов (выполняющих функцию химического и термического балласта) происходит за счет большого движущего импульса струй воздуха, вдуваемого в камеру сгорания. Благодаря специальной конструкции сопел горелок FLOX® происходит управляемое и полностью беспламенное сгорание без пульсаций и без видимого факела, а также без характерного шума, издаваемого факелом.

Для осуществления этого процесса топливо смешивается с воздухом для горения в том месте, где уже произошло необходимое смешение с печными газами, но еще остается достаточная сме-

шивающая энергия турбулентности для осуществления реакций горения. Такой беспламенный режим горения возможен только выше температуры самовоспламенения топлива, которую, ради безопасности, можно принять равной 850 °C. Поскольку беспламенное горение невидимо, контроль безопасности горелки посредством детектора ионизации или ультрафиолета невозможен: при этом единственной мерой безопасности является температура печи выше пороговой величины 850 °C.

Горелки, описанные в данной статье, приспособлены для работы как в режиме Пламя (используемом для запуска из холодного состояния), так и в режиме беспламенного горения FLOX®. Переключение не представляет сложности, и поэтому не требуются отдельные горелки для режимов горения ниже и выше 850 °C. При нагреве печи выше пороговой температуры FLOX® возможно переключение в беспламенный режим, при этом значительно снижается уровень шума. Что самое главное, значительно снижается уровень выбросов NOx, до 10-20% от величины выбросов в режиме «Пламя».

Посредством беспламенного процесса решается проблема возрастания уровня образования NOx при увеличении температуры предварительного нагрева воздуха. В обычных условиях горения «Пламя», уровень образования NOx возрастает значительно быстрее температуры догрева, тогда как в беспламенном режиме он падает почти на порядок от этой величины. Таким способом можно использовать предварительный высокотемпературный нагрев воздуха практически без ограничений с весьма значительной экономией энергии, а, следовательно, и со значительным выигрышем в рентабельности.

Для реализации этой возможности и для эффективного нагрева воздуха были предложены рекуперативные горелки со встроенным нагревателем воздуха в виде противоточного рифленого теплообменника (Рисунок 5).



**Рисунок 5 – Горелка с предварительным нагревом и камерой горения**

Была выбрана горелка REKUMAT® с камерой горения специальной конструкции: она дает либо четыре аксиальных факела, либо четыре беспламенных струи под углом 90°.



**Рисунок 6 – Горелка с плоским факелом в режиме Пламя**



**Рисунок 7 – Горелка с плоским факелом в беспламенном режиме**

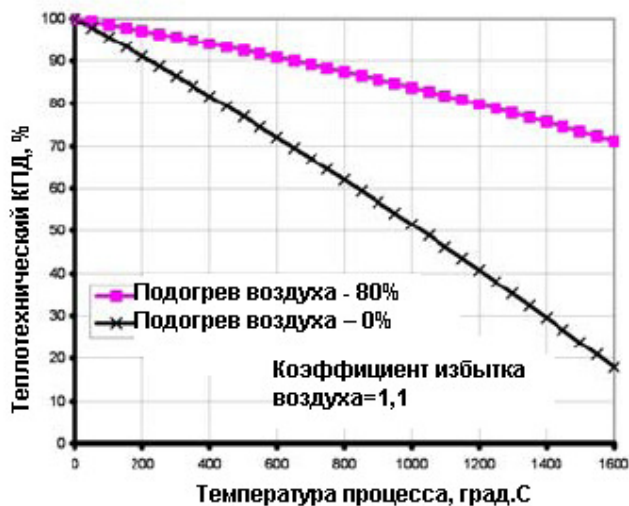
Каждая струя воздуха для горения имеет настолько высокую скорость на выхо-

де, что увлекает за собой достаточное количество печных газов из внутреннего пространства печи перед реакцией с топливом и установлением режима управляемого беспламенного горения. Выходной импульс сопел горелки и создаваемая структура потоков формируют теплопередачу к кузнечному слитку и стенкам печи. Раньше конвективная теплопередача к зоне стенки, смежной с горелкой, перегревала стенку, и она становится способной передавать энергию слитку посредством излучения. В противоположность этому решению, использование горелок с плоским факелом исключает прямой контакт между факелом и слитком. Таким способом можно избежать локального перегрева.

Кроме того, заметно улучшается температурная равномерность благодаря разделению факела на четыре одиночных струи. Рисунки 6 и 7 показывают происходящее в испытательной печи: на Рисунке 6 горелка работает в режиме Пламя, на Рисунке 7 она работает в беспламенном или FLOX® режиме.

Отчетливо видно, что в режиме Пламя имеет место перегрев стены возле насадки горелки (Рисунок 6), тогда как по Рисунку 7 можно сделать вывод о высокой степени равномерности распределения температуры.

Ожидаемое снижение удельного потребления газа лежало в расчетных пределах (от 20% до 35%, в зависимости от температуры, сравнение горелок с эффективным предварительным нагревом воздуха и горелок с отсутствием предварительного нагрева: см. Рисунок 8), даже без учета снижения массы опор, на которые укладывается слиток. Эти ожидания более чем оправдались на практике. Кроме того, увеличивается суммарная доступная мощность, практически вдвое, обеспечивая более высокую производительность и/или более высокотемпературные циклы, что улучшает пригодность печи к высокопроизводительной эксплуатации.



**Рисунок 8 – Повышение термической эффективности при предварительном нагреве воздуха**

FLOX® и REKUMAT® являются зарегистрированными торговыми марками WS Wärmeprozessstechnik GmbH.

#### Об авторах:

*Hans Kaszog является руководителем Отдела энергии и контроля в Buderus Edelstahlwerke, Wetzlar, Germany.*  
*Joachim Wünnig является Генеральным директором,*  
*Uwe Bonnet является сотрудником Северо-Западного Технического управления WS Wärmeprozessstechnik GmbH, Renningen, Germany.*

## Заключение

Отличительные особенности и преимущества горелок с плоским факелом, примененных в кузнечной печи, можно суммировать следующим образом:

- Легко достигнуто повышение термической эффективности более чем на 30% относительно варианта без использования предварительного нагрева воздуха.
- Значительно снижен уровень термического образования NOx, даже при очень высоком предварительном нагреве воздуха.
- Весь температурный диапазон может быть охвачен одной горелкой (режим Пламя и режим FLOX®).
- Возможно свести к минимуму проблемы, порождаемые окислением, и контроль безопасности.
- Распределение на четыре сопла нагревает слиток косвенным образом, уменьшая степень окисления.
- Керамическая конструкция камеры сгорания значительно сокращает необходимое обслуживание.